

PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN REDES DE BAJA TENSIÓN

JUAN DAVID FRANCO FRANCO  
JOHN NOLBERT ECHEVERRY MUÑETONEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
PEREIRA

2018

PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN REDES DE BAJA TENSIÓN

JUAN DAVID FRANCO FRANCO  
JOHN NOLBERT ECHEVERRY MUÑETONEZ

Monografía para optar al título de Ingeniero Electricista

Director  
Ms. JORGE HUMBERTO SANZ ALZATE

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA  
PEREIRA

2018

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Firma del Director

Pereira, 8 junio de 2018

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer en general a la Universidad Tecnológica de Pereira, y de forma especial a la facultad de ingeniería eléctrica y a los docentes, que han sido fuente de motivación y apoyo.

Agradecer al Ingeniero Jorge Humberto Sanz, por su paciencia e invaluable aporte al desarrollo de esta tesis, a través de comentarios y discusiones.

## DEDICATORIA

A Dios por permitirme entender que la vocación humana es un camino de amor, por lo que, todo lo que siempre realice tendrá como condición el amor.

A mi familia, por toda la paciencia y todo el amor incondicional ofreciendo una fuente de motivación durante todos estos años de estudio.

A mis amigos, por estar presentes siempre y por ser fuentes de apoyo y consejos incondicionales.

Juan David Franco Franco.

Dedico esta obra primeramente a mi Dios por permitirme tener vida, salud y poder realizar uno más de mis propósitos que es ser ingeniero electricista.

A mis padres Norberto Echeverry y Gloria Muñetonez por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica para poder llegar a ser un profesional, muchos de mis logros se los debo a ustedes.

A mis hermanos Nestor y Vanessa Echeverry por brindarme su apoyo, comprensión y nunca perder la fe en mí, a pesar del tiempo y la distancia.

A mi familia, profesores, compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas.

John Nolbert Echeverry Muñetonez.

## Tabla de contenido

<b>1.</b>	<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b>9</b>
<b>1.1.</b>	<b><i>Planteamiento del problema</i></b> .....	<b>9</b>
<b>1.2.</b>	<b><i>Justificación</i></b> .....	<b>9</b>
<b>1.3.</b>	<b><i>Objetivos</i></b> .....	<b>10</b>
<b>1.3.1.</b>	<b><i>General</i></b> .....	<b>10</b>
<b>1.3.2.</b>	<b><i>Específicos</i></b> .....	<b>10</b>
<b>1.4.</b>	<b><i>Estado del arte</i></b> .....	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b><i>PRÁCTICAS Y REQUISITOS RECOMENDADOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA</i></b> .....	<b>11</b>
<b>2.1.</b>	<b><i>Resumen</i></b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.</b>	<b><i>Ámbito de aplicación</i></b> .....	<b>11</b>
<b>2.3.</b>	<b><i>Propósito</i></b> .....	<b>12</b>
<b>2.4.</b>	<b><i>Definiciones</i></b> .....	<b>13</b>
<b>3.</b>	<b><i>MEDICIÓN DE ARMÓNICOS</i></b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.</b>	<b><i>Medición de la anchura de la ventana</i></b> .....	<b>15</b>
<b>3.2.</b>	<b><i>Mediciones armónicas de muy corto tiempo</i></b> .....	<b>15</b>
<b>3.3.</b>	<b><i>Mediciones armónicas de corto tiempo</i></b> .....	<b>16</b>
<b>3.4.</b>	<b><i>Evaluación estadística</i></b> .....	<b>16</b>
<b>4.</b>	<b><i>LÍMITES DE ARMÓNICOS RECOMENDADOS</i></b> .....	<b>17</b>
<b>4.1.</b>	<b><i>Límites de tensión armónica recomendada</i></b> .....	<b>17</b>
<b>4.2.</b>	<b><i>Límites de distorsión de corriente para sistemas con valores nominales entre 120 V y 69 kV</i></b> .....	<b>18</b>
<b>4.3.</b>	<b><i>Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con valores nominales por encima de 69 kV a 161 kV</i></b> .....	<b>20</b>
<b>4.4.</b>	<b><i>Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con valores nominales por encima de 161 kv</i></b> .....	<b>21</b>
<b>4.5.</b>	<b><i>Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con valores nominales por encima de 69 kV a 161 kV</i></b> .....	<b>22</b>

Anexo A.....	23
Anexo B.....	25
Anexo C.....	27
5. <b>METODOLOGÍA</b> .....	29
5.1. <i>Procedimientos para el estudio y análisis de armónicos</i> .....	29
6. <b>PROCEDIMIENTO PARA VERIFICAR LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA SUBESTACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.</b> .....	32
6.1. <i>Objetivo</i> .....	32
6.2. <i>Diagrama unifilar</i> .....	32
6.3. <i>Características del transformador de potencia</i> .....	33
6.4. <i>Nivel de trabajo o demanda durante la medida</i> .....	35
6.5. <i>Punto de conexión común</i> .....	55
7. <b>INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS MEDIDOS</b> .....	56
7.1. <i>Presencia de armónicos de corriente</i> .....	57
7.2. <i>Presencia de armónicos de tensión</i> .....	60
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

## **RESUMEN**

Con base en el estándar IEEE 519-2014 y una serie de medidas realizadas en redes de baja tensión, se pretende conocer los parámetros de dichos armónicos para poder establecer el control y responsabilidad de los armónicos en estas redes. La presencia de los armónicos en las redes de baja tensión, generados por cargas no lineales, que implican un aporte negativo de circulación de corrientes armónicas por el conductor del neutro de dicha red, que sumados a las corrientes de desbalance del sistema hacen que la ampacidad de dicho conductor pueda ser superada. Los efectos negativos de la presencia de estas corrientes no solo afectan a los conductores de la red, sino también a los transformadores del sistema. La utilización de los parámetros de la IEC 60364-5-52 complementados con los del estándar IEEE 519-2014 permite el dimensionamiento adecuado de los conductores.



# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1.Planteamiento del problema**

El aumento en los últimos años de cargas del tipo no lineales, afecta la calidad del servicio de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos de distribución, estas cargas, absorben corriente no-sinusoidal que a su vez producen la circulación de corrientes armónicas que distorsionan la forma de onda de tensión. Dentro de los problemas presentes y sub-áreas de estudio debido a este fenómeno se pueden encontrar: Fallas en bancos de condensadores y cables por rompimiento del material dieléctrico, resonancias que producen sobretensiones y sobrecorrientes en el sistema, interferencia en las comunicaciones, oscilaciones mecánicas en máquinas síncronas y motores de inducción, aumento de pérdidas en el núcleo y en los devanados de los transformadores, presencia de armónicos en redes de baja tensión. Entre los nichos de estudio se pueden evaluar los costes técnicos, corrección de armónicos, disparo de protecciones, circulación de armónicos por el conductor de neutro, y revisión de resoluciones por parte de la comisión de regulación de energía y gas que regulan la calidad del servicio, como también los estándares y normas internacionales.

Para verificar la presencia de armónicos en una red de baja tensión, es importante definir que el nivel de baja tensión se encuentra estipulado por el artículo 12° del reglamento técnico de instalaciones eléctricas, como tensión nominal mayor o igual a 25V y menor o igual a 1000V.

En lo referente, se requiere entender y aplicar el estándar IEEE 519-2014, como referencia recomendada, puesto que en la realidad en lo que concierne a los estándares el no cumplimiento de estos límites de distorsión de tensión y corriente recomendados, podrían, desestabilizar los sistemas eléctricos generando desgastes y mayores pérdidas en las redes de distribución. [1], [2],[3]

## **1.2.Justificación**

El proyecto de grado titulado como: Presencia de armónicos en redes de baja tensión, busca entender el estándar IEEE 519-2014 que está enfocado en incentivar el control y responsabilidad sobre estos efectos, por parte de los comercializadores de red y sobre la industria que manufactura equipos y dispositivos electrónicos que presentan características no-lineales. De este modo, resolviendo y entendiendo el problema de armónicos implica el aporte en la solución de los efectos negativos de la circulación de corrientes armónicas generadas por cargas del tipo no-lineales a través de la impedancia interna de la red, que genera una distorsión en la forma de onda de tensión, que a su vez, abarca el calentamiento de conductores, transformadores, costes técnicos, errores en la medición en los instrumentos, y circulación de corrientes por el conductor de neutro, entre otros.

Lo anterior puede ser atenuado con el cumplimiento de los límites de tensión y corriente recomendados por el estándar mencionado anteriormente.

Finalmente, se realiza una monografía, exponiendo en una tabla comparativa estos niveles de porcentaje de distorsión, medidos en una red de baja tensión. [1], [3].

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

- Realizar una monografía para entender y aplicar el estándar IEEE 519-2014.
- Establecer los niveles de distorsión armónica existentes en la red de baja tensión escogida.

#### **1.3.2. Específicos**

- Revisar otras literaturas y estudios disponibles y simultáneamente realizar la traducción del estándar IEEE 519-2014.
- Obtener el diagrama unifilar de la instalación.
- Indicar la distribución de las cargas distorsionantes y no distorsionantes.
- Señalar el punto de medida.
- Comparar los límites de distorsión armónica medidos, con los recomendados por el estándar IEEE 519-2014.

### **1.4. Estado del arte**

En el estándar IEEE 519-2014, se establecen las metas de diseño de los sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales, en este estándar se describen las formas de onda de tensión y corriente que pueden existir, como también los límites de distorsión de la forma de onda del sistema. El punto de conexión común, point of common coupling, PCC, se conoce como el punto de conexión común entre una instalación de un usuario con la red pública del sistema eléctrico, dicho esto, los límites recomendados en este estándar representan una responsabilidad compartida en el control de armónicos entre los operadores de red y los usuarios abonados a esta.

## **2. PRÁCTICAS Y REQUISITOS RECOMENDADOS PARA EL CONTROL DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA**

### **2.1. Resumen**

Los usos de cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico de potencia incluyen convertidores estáticos de potencia, dispositivos descargadores de arco, dispositivos magnéticos saturados, y, en menor grado, máquinas rotativas. Los convertidores estáticos de potencia de energía eléctrica son las mayores cargas no lineales y son usadas en la industria para gran variedad de propósitos, tales como fuentes de alimentación electromecánica, variadores de velocidad, y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS). Estos dispositivos son muy útiles debido que pueden convertir corrientes ac a dc, dc a dc, dc a ac, y ac a ac.

Las cargas no lineales cambian la naturaleza sinusoidal de la corriente alterna (y por consecuencia una caída en la tensión ac), resultando de tal modo en un flujo armónico de corriente en el sistema de potencia que puede causar interferencia con los circuitos de comunicaciones y otros tipos de equipos eléctricos. Estas corrientes armónicas también conducen a mayores pérdidas y calentamiento en numerosos dispositivos electromagnéticos (motores, transformadores, etc.). Cuando son usados compensadores de potencia reactiva, con capacitores para mejorar el factor de potencia, pueden ocurrir condiciones de resonancia que resultan en altos niveles de distorsión de armónicos de tensión y corriente, al ocurrir condiciones de resonancia, estas son asociadas con cargas no lineales.

Las fuentes comunes de armónicos de corriente en el sistema de potencia, incluyen, convertidores electrónicos de potencia, hornos de arco, compensador estático VAR, inversores para generación distribuida, controladores de fase, cicloconvertidores, y convertidores ac-dc (rectificadores) comúnmente usados como fuentes conmutadas de alimentación y controladores de motores por modulación por ancho de pulso (PWM). Cada uno de estos dispositivos productores de armónicos pueden tener diferentes componentes armónicas de corriente de orden superior a lo largo del tiempo o cada uno puede presentar una característica diferente dependiendo del dispositivo de control, la característica del sistema, y otras variables. [1]

### **2.2. Ámbito de aplicación**

Esta práctica recomendada establece los objetivos para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen tanto cargas lineales como no lineales. Los tipos de formas de onda de tensión y corriente que pueden existir a lo largo del sistema son descritos, como también los límites de distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema. La conexión entre las fuentes y cargas es descrita como el punto de acople común y la evaluación de los objetivos de diseño podría minimizar la interferencia entre los equipos eléctricos.

Esta recomendación práctica está dirigida a limitaciones de estado estacionario. Sin embargo, se pueden encontrar condiciones transitorias que superarían estos límites. Este documento establece la calidad de potencia que debe ser proporcionada en el punto de acople común. Aun así, no cubre los efectos en radio-frecuencia; sin embargo, esta guía se presta para sistemas de alambrado telefónico. [1]

### **2.3.Propósito**

Esta traducción de la recomendación práctica será usada como guía para el diseño de sistemas de potencia con cargas no lineales. Los límites se establecen para estados estacionarios de operación y es recomendada para condiciones “en el peor de los casos”. Igualmente, condiciones transitorias superiores a estos límites podrían ser encontradas. En cualquier caso, los valores límites dados en este documento son recomendaciones y podrían no tenerse en cuenta en todos los casos. Debido a la naturaleza de las recomendaciones, hay un poco de conservatismo que puede no ser necesario en muchos de los casos.

Esta recomendación práctica podría ser aplicada en los puntos de conexión entre los propietarios del sistema o los operadores y los usuarios del sistema de potencia. Los límites en esta recomendación práctica están destinados en aplicaciones en un punto de acople común (PCC) entre el propietario del sistema u operadores y un usuario, donde el PCC es usualmente tomado como el punto más cercano al usuario donde el propietario del sistema o el operador podría ofrecer el servicio a otro usuario. Con frecuencia en usuarios industriales (I.e., plantas de manufactura) a través de un servicio dedicado de transformación, el punto de acople común se encuentra en el lado de alta tensión del transformador. Para usuarios comerciales (centros de oficinas, centros comerciales, etc.) alimentados a través de un solo transformador general, el punto de acople común es comúnmente puesto en el lado de baja tensión del transformador que suministra el servicio.

Los límites en esta recomendación práctica representan una responsabilidad compartida para el control de armónicos entre propietarios de sistema, operadores y/o usuarios. Los usuarios producen corrientes armónicas que fluyen a través del sistema o desde el mismo operador, que conducen a armónicos de tensión en las tensiones de alimentación en la periferia de otros usuarios. La cantidad de distorsión armónica de tensión suministrada a los usuarios es una función de los efectos agregados de la corriente armónica que se transmite a lo largo de los mismos y la impedancia característica del sistema de alimentación.

Los límites de distorsión de tensión son pensados siempre para reducir los efectos negativos en los usuarios y equipos del sistema. El mantenimiento de los niveles de distorsión armónica de tensión dentro de los límites requiere que:

- Todos los límites de emisión de corriente armónica estén en valores razonables determinados en forma equitativa, basados en la participación inherente que tiene cada usuario en el sistema de suministro de la instalación.
- Cada propietario del sistema u operador toma acciones para disminuir el nivel de distorsión de tensión mediante la modificación de la impedancia característica del sistema de alimentación de ser necesario.

Para permitir que el propietario o el operador del sistema controlen la impedancia característica del sistema para reducir la distorsión de tensión cuando es necesario, los usuarios no podrían añadir equipos pasivos que afecten dicha impedancia característica, en este sentido, tales equipos podrían incrementar la distorsión de tensión. En efecto, quizás estas acciones por un usuario podrían producir una cantidad excesiva de distorsión armónica de tensión. Similarmente, añadir equipos pasivos (llevan a una impedancia característica no deseada en el sistema) esta, podría ser controlada por el usuario de alguna manera con dispositivos de producción armónicos de corriente. [1]

## **2.4.Definiciones**

Para propósitos de este documento, los siguientes términos y definiciones son aplicables. Para términos no definidos en esta cláusula debería consultarse el Diccionario Online de Estándares IEEE.

Armónico (componente): Un componente de orden superior a uno de la serie de Fourier de una cantidad periódica. Por ejemplo, en un sistema de 60Hz, la armónica de orden 3, también conocido como el "tercer armónico", es de 180 Hz. [1]

Interarmónico (componente): un componente de frecuencia de una cantidad periódica que no es un múltiplo entero de la frecuencia con la que el sistema de alimentación está en funcionamiento (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz). [1]

Producto I-T: La influencia inductiva expresada en términos del producto de la media cuadrática de la magnitud actual (I), en amperios, por su factor de influencia telefónica (TIF). [1]

Producto KV-T: La influencia inductiva expresada en términos del producto de la media cuadrática de la magnitud actual (V), en kilovoltios, por su factor de influencia telefónica (TIF). [1]

Corriente máxima de la carga de la demanda: Este valor de corriente se establece en el punto de acoplamiento común y debe ser tomado como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada uno de los doce meses anteriores dividido por 12. [1]

Muesca: Switching (u otros) perturbación en la forma de onda de tensión de alimentación normal, que dura menos de 0,5 ciclos, que inicialmente es de polaridad opuesta de la forma de onda y por lo tanto se resta de la forma de onda normal, en términos del valor pico de la tensión de la perturbación. Esto incluye la pérdida de tensión de hasta 0,5 ciclos. [1]

Profundidad de muesca: La profundidad promedio de la muesca de tensión de línea de la onda sinusoidal de la tensión. [1]

Área de la muesca: El área de muesca de tensión de línea. Es el producto de la profundidad de muesca, en voltios, multiplicado por el ancho de la muesca medido en microsegundos. [1]

Punto de acoplamiento común (PCC): Punto de un sistema público de suministro de instalación de energía eléctrica más cercano a una carga particular, en el que otras cargas están, o podrían estar, conectadas. El PCC es un punto situado aguas arriba de la instalación considerada. [1]

Número de pulso: El número total de conmutaciones no simultáneas sucesivas que ocurren dentro del circuito del convertidor durante cada ciclo cuando opera sin control de fase. También es igual al orden del armónico principal de la tensión continua, es decir, el número de pulsos presentes en la tensión de salida de DC en un ciclo de la tensión de alimentación. [1]

Relación de cortocircuito: En un lugar determinado, la relación entre la corriente de cortocircuito disponible, en amperios, y la corriente de carga, en amperios. [1]

Factor de influencia telefónica (TIF): Para una onda de tensión o corriente en un circuito de alimentación eléctrica, la relación entre la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la media cuadrática ponderada de todas los componentes de la onda sinusoidal (incluida las ondas de corriente alterna fundamental y armónicas) al valor de la media cuadrática (no ponderada) de la onda completa. [1]

Demanda total de distorsión (TDD): La relación de la raíz media cuadrática del contenido armónico, teniendo en cuenta los componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los Inter armónicos, expresado como un porcentaje de la demanda máxima de corriente. Los componentes armónicos de orden superior a 50 pueden incluirse cuando sea necesario. [1]

Distorsión armónica total (THD): La relación de la raíz media cuadrática del contenido armónico, teniendo en cuenta los componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente los Inter armónicos, expresada como un porcentaje de la fundamental. Los componentes armónicos de orden superior a 50 pueden incluirse cuando sea necesario. [1]

### **3. MEDICIÓN DE ARMÓNICOS**

Con el fin de evaluar niveles de armónicos para la comparación con los límites recomendados en este documento, cualquier instrumento utilizado debe cumplir con las especificaciones de IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30. La mayoría de los puntos pertinentes de las especificaciones IEC se resumen en 3.1 a 3.4. [1]

#### **3.1. Medición de la anchura de la ventana**

El ancho de la ventana de medida utilizada por los instrumentos digitales que emplean técnicas de Transformada Discreta de Fourier debe ser de 12 ciclos (aproximadamente 200 ms) para sistemas de alimentación de 60 Hz (10 ciclos para sistemas de alimentación de 50 Hz). Con este ancho de ventana, los componentes espectrales estarán disponibles cada 5 Hz (p. ej., 0, 5, 10...50, 55, 60, 65, 70... Hz). Para los propósitos de este documento, se considera que una magnitud de componente armónico es el valor en una frecuencia central (60, 120, 180, etc., y 50, 100, 150, etc. Hz para sistemas de potencia de 60 Hz y 50 Hz, respectivamente) junto con los dos valores de intervalo de clase de 5 Hz adyacentes. Los tres valores son combinados en un solo valor rms que define la magnitud armónica para la componente de frecuencia central particular. [1]

#### **3.2. Mediciones armónicas de muy corto tiempo**

Los valores de armónicos de muy corto tiempo se evalúan durante un intervalo de 3 segundos basado en una agregación de 15 ventanas de ciclos consecutivos de 12 (10) para sistemas de potencia de 60 (50) Hz. Las componentes de frecuencia individuales son agregadas con base a un cálculo rms como se muestra en la ecuación (1) donde  $F$  representa la tensión (V) o corriente (I),  $n$  representa el orden del armónico e  $i$  es un contador simple. El subíndice  $vs$  se utiliza para denotar "muy corto." En todos los casos,  $F$  representa un valor rms. [1]

$$F_{n,vs} = \sqrt[2]{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F_{n,i}^2}$$

Ecuación (1)

### 3.3. Mediciones armónicas de corto tiempo

Los valores de armónicos de corto tiempo se evalúan durante un intervalo de 10 minutos en base a una agregación de 200 valores consecutivos de muy corto tiempo para una determinada componente de frecuencia. Los 200 valores son agregados basados en un cálculo rms como se muestra en la ecuación (2) donde F representa la tensión (V) o corriente (I), n representa el orden armónico e i es un contador simple. El subíndice sh se utiliza para denotar "muy corto". En todos los casos, F representa un valor rms. [1]

$$F_{n,sh} = \sqrt[2]{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F_{(n,vs),i}^2}$$

Ecuación (2)

### 3.4. Evaluación estadística

Los valores de armónicos de corto tiempo y de muy corto tiempo deben ser acumulados en períodos de un día y una semana, respectivamente. Para mediciones de armónicos de muy corto tiempo, el valor del 99<sup>th</sup> percentil (es decir, el valor que se excede del 1% del período de medición) debe calcularse para cada período de 24 horas para la comparación con los límites recomendados en la cláusula 5. Para mediciones armónicas a corto plazo, los valores del 95<sup>th</sup> y 99<sup>th</sup> percentil (es decir, aquellos valores que exceden por 5% y 1% del período de medición) debe calcularse para cada período de 7 días para la comparación con los límites recomendados en la cláusula 5. Estas estadísticas deben ser usadas tanto para la tensión como para los armónicos de corriente, a excepción del valor del 99<sup>th</sup> percentil de corto tiempo no es recomendado para el uso con los armónicos de tensión. [1]



## **4. LÍMITES DE ARMÓNICOS RECOMENDADOS**

Debido a la gestión de armónicos en los sistemas de potencia se considera que es una responsabilidad compartida, entre usuarios y propietarios del sistema o los operadores de la red, con referencia a los límites recomendados de armónicos en tensión y corriente.

Los valores recomendados en esta cláusula están basados en el hecho de que algunos niveles de distorsión de tensión son generalmente aceptables y ambos propietarios del sistema u operadores y usuarios deben trabajar conjuntamente para mantener la distorsión de tensión real por debajo de los niveles aceptables. La suposición subyacente de estos límites recomendados es que, al limitar las inyecciones de corrientes armónicas por los usuarios, la tensión de distorsión puede mantenerse por debajo de los niveles aceptables. En el caso que estos límites de corrientes armónicas, no solo resulten en niveles aceptables de tensión de distorsión, los propietarios del sistema o los operadores de este podrían tomar acciones para modificar la característica del sistema, para que los niveles de distorsión de tensión sean aceptables. Los niveles aceptables de distorsión de tensión forman la base de los límites de armónicos de tensión en la tabla 5.1.

Los límites recomendados en esta cláusula solamente son aplicados para el punto de acople común y no podrían ser aplicados en piezas de equipos individuales o en ubicaciones dentro de instalaciones del usuario. En la mayoría de los casos, los armónicos de tensión y corriente en estos lugares podrían encontrarse significativamente mayores que los límites recomendados para el punto de acople común, debido a la falta de diversidad, cancelación y otros fenómenos que tienden a reducir los efectos combinados de múltiples fuentes de armónicos a niveles por debajo de la suma algebraica. [1]

### **4.1.Límites de tensión armónica recomendada**

En el punto de acople común (PCC), los propietarios o los operadores del sistema deben limitar los armónicos de tensión de los conductores de línea a neutro de la siguiente manera:

- El percentil 99<sup>th</sup> diario de valores de muy corto tiempo (3 s) podría ser mucho menor que 1.5 veces los valores dados en la Tabla 1.
- El percentil 95<sup>th</sup> semanal de valores de corto tiempo (10 min) podría ser menor que los valores dados en la Tabla 1.

Todos los valores deben estar en porcentaje de la tensión de la frecuencia nominal de la corriente alterna en el punto de acople común (PCC). La Tabla 1 se aplica para armónicos de tensión cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia de la corriente alterna. [1]

Tabla 1 —Límites de distorsión de tensión

Barra de tensión V en PCC	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sistemas de alta tensión pueden tener por encima del 2.0% del THD donde la causa es un terminal de HVDC cuyos efectos serían atenuados en puntos de la red donde usuarios futuros tal vez se conecten.

Información acerca de límites de tensiones interarmónicas se da el en Anexo A y se basa en el parpadeo de la lámpara evaluado utilizando las técnicas de medidas descritas en IEEE Std 1453 y IEC 61000-4-15. La información del Anexo A no está basada en los efectos de los interarmónicos sobre otros tipos de equipos y sistemas, como sistemas de generación mecánica, motores, transformadores, señalización y sistemas de comunicación, y filtros. Se debe dar la debida consideración a estos efectos y los límites de corriente interarmónicas debe ser desarrollados comenzando desde la información del Anexo A en un caso-por-caso, utilizando conocimiento específico del sistema de suministro, cargas de usuarios conectadas, y disposiciones para futuras expansiones de la red de usuarios. [1]

#### 4.2.Límites de distorsión de corriente para sistemas con valores nominales entre 120 V y 69 kV

Los límites en esta subcláusula se aplican a usuarios conectados donde la tensión nominal en el punto de acople común (PCC) es 120V a 69kV. En el punto de acople común (PCC), los usuarios deben limitar sus corrientes armónicas de la siguiente manera:

- El percentil 99<sup>th</sup> diario de corrientes armónicas de muy corto tiempo (3 s) podría ser menor que 2.0 veces los valores dados en la Tabla 2.
- El percentil 99<sup>th</sup> semanal de corrientes armónicas de corto tiempo (10 min) podría ser menor que 1.5 veces los valores dados en la Tabla 2.

- El percentil 95<sup>th</sup> semanal de corrientes armónicas de corto tiempo (10 min) podrían ser menor que los valores dados en la Tabla 2.

Todos los valores deben estar en porcentaje de la corriente máxima demandada,  $I_L$ . Este valor de corriente es establecido en el punto de acople común y podría ser tomado como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada una de los doce meses previos dividido por 12. La Tabla 2 se aplica a corrientes armónicas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente alterna. [1]

Tabla 2 — Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV

<b>Corriente maxima de distorsion armonica en porcentaje de <math>I_L</math></b>						
<b>Orden de armonico individual (armonico <i>impar</i>)<sup>a,b</sup></b>						
$I_{sh}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 25$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4,0	2,0	1,50	0,6	0,30	5,0
$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,50	4,0	1,5	0,70	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,50	5,0	2,0	1,0	15,0
$> 1000$	15	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

<sup>a</sup> Incluso los armónicos se limitan a 25% del armónico impar del límite superior.

<sup>b</sup> La distorsión de corriente que resulta en un dc offset, por ejemplo, los convertidores de media onda, no está permitido.

<sup>c</sup> Todos los equipos de generación de energía se limitan a estos valores de distorsión de corriente, independientemente del actual  $I_{sh}/I_L$ .

Dónde:

$I_{sh}$  = máxima corriente de corto circuito en el punto de acople común (PCC)

$I_L$  = máxima carga de corriente demandada (componente de la frecuencia fundamental) en el punto de acople común (PCC) debajo de las condiciones de operación normal de la carga.

Para componentes de corrientes interarmónicas con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente alterna, los usuarios deben limitar la componente a niveles suficientemente bajos como para no producir efectos indeseados en el sistema de potencia y en equipos conectados. Los valores límite y los índices estadísticos apropiados deben desarrollarse en un caso-por-caso comenzando desde la guía del Anexo A y considerando las especificaciones del sistema de alimentación, cargas de usuarios conectadas, y disposiciones para futuras expansiones de la red de usuarios. [1]

#### 4.3.Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con valores nominales por encima de 69 kV a 161 kV

Los límites en esta subcláusula se aplican a los usuarios conectados al sistema donde la tensión nominal  $V$  en el punto de acople común (PCC) se encuentra entre  $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ . En el punto de acople común (PCC), los usuarios deben limitar sus corrientes armónicas de la siguiente manera:

- El percentil 99<sup>th</sup> diario de corrientes armónicas de muy corto tiempo (3 s) podría ser menor que 2.0 veces los valores dados en la Tabla 3.
- El percentil 99<sup>th</sup> semanal de corrientes armónicas de corto tiempo (10 min) podría ser menor que 1.5 veces los valores dados en la Tabla 3.
- El percentil 95<sup>th</sup> semanal de corrientes armónicas de corto tiempo (10 min) podrían ser menor que los valores dados en la Tabla 3.

Todos los valores deben estar en porcentaje de la corriente máxima demandada,  $I_L$ . Este valor de corriente es establecido en el punto de acople común y podría ser tomado como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada una de los doce meses previos dividido por 12. La Tabla 3 se aplica a corrientes armónicas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente alterna. [1]

Tabla 3 —Límites de distorsión de corriente para sistemas por encima de 69 kV a 161 kV

Corriente maxima de distorsion armonica en porcentaje de $I_L$						
Orden de armonico individual (armonico <i>impar</i> ) <sup>a,b</sup>						
$I_{sh}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 25$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$20 < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
$50 < 100$	5,0	2,25	2,0	0,8	0,35	6,0
$100 < 1000$	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
$> 1000$	7,5	3,5	3	1,25	7,5	10,0

<sup>a</sup> Incluso los armónicos se limitan a 25% del armónico impar del límite superior.

<sup>b</sup> La distorsión de corriente que resulta en un dc offset, por ejemplo, los convertidores de media onda, no está permitido.

<sup>c</sup> Todos los equipos de generación de energía se limitan a estos valores de distorsión de corriente, independientemente del actual  $I_{sh}/I_L$ .

Dónde:

$I_{sh}$ = máxima corriente de corto circuito en el punto de acople común (PCC)

$I_L$ = máxima carga de corriente demandada (componente de la frecuencia fundamental) en el punto de acople común (PCC) debajo de las condiciones de operación normal de la carga.

Para componentes de corrientes interarmónicas con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente alterna, los usuarios deben limitar la componente a niveles suficientemente bajos como para no producir efectos indeseados en el sistema de potencia y en los equipos conectados. Los valores límite y los índices estadísticos apropiados deben desarrollarse en un caso-por-caso comenzando desde la guía del Anexo A y considerando las especificaciones del sistema de alimentación, cargas de usuarios conectadas, y disposiciones para futuras expansiones de la red de usuarios. [1]

#### 4.4.Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con valores nominales por encima de 161 kv

Los límites en esta subcláusula se aplican a los usuarios conectados al sistema donde la tensión nominal  $V$  en el punto de acople común (PCC) es mayor que 161 kV. En el punto de acople común (PCC), los usuarios deben limitar sus corrientes armónicas de la siguiente manera:

- El percentil 99<sup>th</sup> diario de corrientes armónicas de muy corto tiempo (3 s) podría ser menor que 2.0 veces los valores dados en la Tabla 4.
- El percentil 99<sup>th</sup> semanal de corrientes armónicas de corto tiempo (10 min) podría ser menor que 1.5 veces los valores dados en la Tabla 4.
- El percentil 95<sup>th</sup> semanal de corrientes armónicas de corto tiempo (10 min) podrían ser menor que los valores dados en la Tabla 4.

Todos los valores podrían ser en porcentaje de la corriente máxima demandada,  $I_L$ . Este valor de corriente es establecido en el punto de acople común y debe tomarse como la suma de las corrientes correspondientes a la demanda máxima durante cada uno de los doce meses previos dividido por 12. La Tabla 4 se aplica a corrientes armónicas cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente alterna. [1]

Tabla 4 —Límites de distorsión de corriente para sistemas >161 kV

Corriente maxima de distorsion armonica en porcentaje de $I_L$						
Orden de armonico individual (armonico <i>impar</i> ) <sup>a,b</sup>						
$I_{sh}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 25$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 25 <sup>c</sup>	1.0	0.5	0.38	0.2	0.10	1.5
25 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.50	1.15	0.45	0.22	3.75

<sup>a</sup> Incluso los armónicos se limitan a 25% del armónico impar del límite superior.

<sup>b</sup> La distorsión de corriente que resulta en un dc offset, por ejemplo, convertidores de media onda, no está permitido.

<sup>c</sup> Todos los equipos de generación de potencia es limitada a estos valores de distorsión de corriente, independientemente del actual  $I_{sh}/I_L$ .

Dónde:

$I_{sh}$ = máxima corriente de corto circuito en el punto de acople común (PCC)

$I_L$ = máxima carga de corriente demandada (componente de la frecuencia fundamental) en el punto de acople común (PCC) debajo de las condiciones de operación normal de la carga.

Para componentes de corriente interarmónica con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente alterna, los usuarios deben limitar la componente a niveles suficientemente bajos como para no producir efectos indeseados en el sistema de potencia y en los equipos conectados. Los valores límite y los índices estadísticos apropiados deben desarrollarse en un caso-por-caso comenzando desde la guía del Anexo A y considerando las especificaciones del sistema de alimentación, cargas de usuarios conectadas, y disposiciones para futuras expansiones de la red de usuarios. [1]

#### **4.5.Límites de distorsión de corriente recomendados para sistemas con valores nominales por encima de 69 kV a 161 kV**

Se recomienda que los valores dados en la Tabla 2, Tabla 3, y Tabla 4 sean incrementados por un factor multiplicador cuando las acciones sean tomadas por un usuario para reducir el orden-inferior de los armónicos. El multiplicador dado en la segunda columna de la Tabla 5 es aplicable cuando se toman medidas para reducir el orden de los armónicos dados en la primera columna. [1]

Tabla 5—Multiplicadores recomendados para aumentos en límites de corrientes armónicas

<b>Orden de armónicos limitados a 25% de los valores dados en la Tabla 2, Tabla 3, y Tabla 4</b>	<b>Multiplicador</b>
5,7	1.4
5,7,11,13	1.7
5,7,11,13,17,19	2
5,7,11,13,17,19,23,25	2.2
↓	↓

Los multiplicadores en la Tabla 5 pueden ser obtenidos como se muestra en la Ecuación (3) donde p es el orden del pulso en rectificadores trifásicos basados en convertidores (p=6,12,18,24, etc.). Estos convertidores producen una característica dominante de corrientes armónicas para ordenes de p(n +/- 1), donde n =1, 2, 3 etc., y significativamente corrientes de magnitudes bajas a otros órdenes. Sin embargo, los multiplicadores recomendados en la Tabla 3 se aplican independientemente para el método usado para reducir los armónicos que podrían ser considerados “armónicos no característicos” para un convertidor de pulso-p siempre y cuando los “armónicos no característicos,” incluyendo el armónico de orden par, se mantienen por debajo del 25% del valor límite dado en la Tabla 2, Tabla 3, o Tabla según corresponda. [1]

$$\text{Multiplicador} = \sqrt{\frac{p}{6}} \quad (3)$$

## **Anexo A**

(Informativo)

### **Límites tensión basados en el parpadeo**

Para componentes interarmónicas que no son múltiplos enteros de la frecuencia de alimentación, los propietarios u operadores del sistema pueden limitar el seminario del 95<sup>th</sup> percentile de corto tiempo de armónicos de tensión a los valores mostrados gráficamente en la Figura A-1 hasta 120 Hz para los sistemas de 60 Hz. Dependiendo del nivel de tensión, los límites armónicos enteros en la tabla 1 pueden ser más restrictivos y deben ser utilizados. Las porciones del rango 0-120 Hz donde los límites armónicos enteros de la tabla 1 son más restrictivos son etiquetados apropiadamente en la Figura A-1. Los valores numéricos correspondientes a la Figura A-1 se presentan en la Tabla A-1 para las tensiones en el PCC menores a 1 kV. Es importante reconocer que la tensión límite Interarmónica sugerida se basan en la lámpara de parpadeo evaluada mediante la técnica de medición descrita en IEEE Std 1453 y IEC 61000-4-15. Estas tensiones límites interarmónicas correlacionan con un parpadeo de corto plazo de severidad Pst con un valor igual a 1.0 para sistemas de 60 Hz; diferentes (pero similares) valores límite pueden ser derivados para sistemas de 50 Hz. Los límites recomendados en Figura A-1 no se basan en los efectos de Interarmónicos en otros sistemas y equipos como sistemas mecánicos de generadores, motores, transformadores, sistemas de señalización y comunicación, y filtros. Deben darse las debidas consideraciones a estos efectos y los límites de corriente interarmónica apropiados deben ser desarrollados sobre una base de caso por caso utilizando conocimientos específicos del sistema de abastecimiento cargas de usuarios conectadas, y disposiciones para futuras expansiones de la red de usuarios.

No hay ningún límite en la componente de 60 Hz en la Figura A-1. El máximo del 5% se aplica a los componentes muy cerca (pero no igual) a 60 Hz. [1]

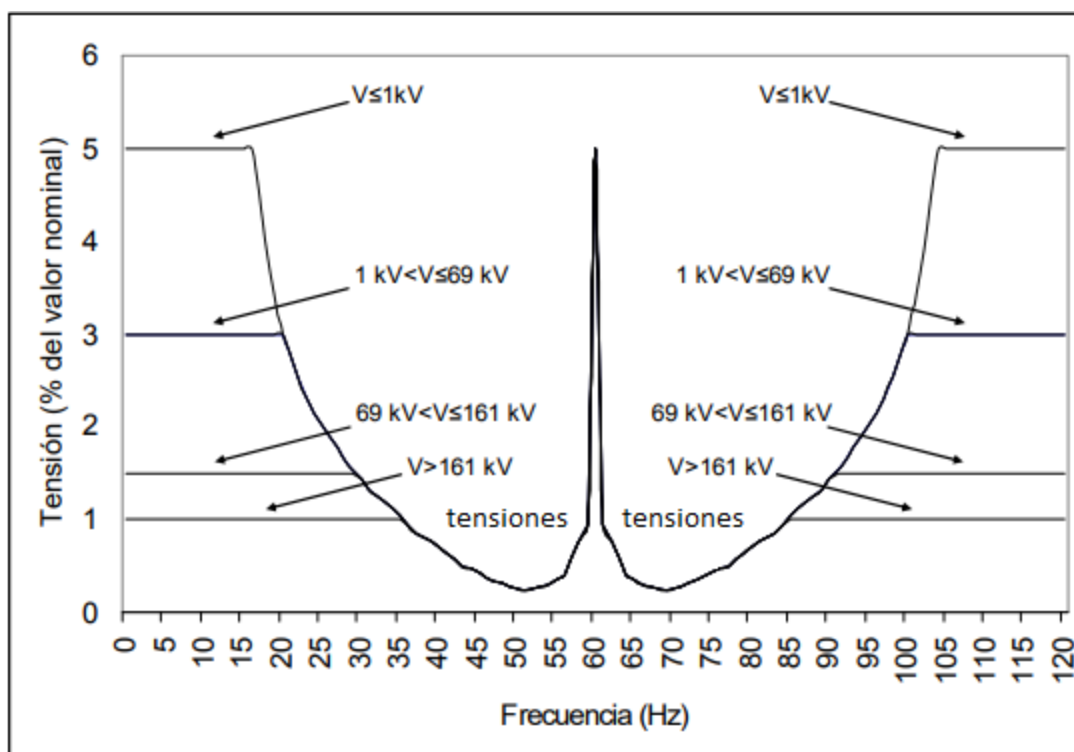


Figura A-1—Límite de tensión interarmónica basados en parpadeo para frecuencias de hasta 120 Hz para sistemas de 60 Hz.

Tabla A-1—Tensiones límites interarmónicas correspondientes a la Figura A-1 para la tensión de PCC menor de 1 kV<sup>a,b</sup>

FRECUENCIA (HZ)	MAGNITUD (%)	FRECUENCIA (HZ)	MAGNITUD (%)	FRECUENCIA (HZ)	MAGNITUD (%)	FRECUENCIA (HZ)	MAGNITUD (%)
16	5	27	1,78	38	0,81	49	0,28
17	4,5	28	1,64	39	0,78	50	0,25
18	3,9	29	1,54	40	0,71	51	0,23
19	3,45	30	1,43	41	0,64	52	0,25
20	3	31	1,33	42	0,57	53	0,27
21	2,77	32	1,26	43	0,5	54	0,29
22	2,53	33	1,2	44	0,48	55	0,35
23	2,3	34	1,13	45	0,43	56	0,4
24	2,15	35	1,05	46	0,38	57	0,58
25	2,03	36	0,95	47	0,34	58	0,77
26	1,9	37	0,85	48	0,31	59	0,95

<sup>a</sup> Los valores para la frecuencia por encima a 60(pero inferiores a 120)Hz son idénticos a los indicados en esta tabla, excepto la frecuencia de interés que de restarse de 120 Hz antes de leer el valor correspondiente. Por ejemplo, el límite de tensión interarmónica para 61 Hz es igual a la dada en la tabla para  $120-61=59$  Hz, que es 0.95 %.



<sup>b</sup> La resolución de frecuencia en la Tabla A-1 es de 1 Hz. La resolución disponible utilizando los métodos recomendados en la cláusula 4 es de 5 Hz. Instrumentos especiales que se convengan en el momento de su uso, pueden ser necesarios para obtener una resolución de 1 Hz.

## Anexo B

(Informativo)

### Factor de influencia telefónica (TIF)

La ponderación TIF es una combinación de característica de mensaje C de ponderación, que explica la relativa interferencia del efecto de varias frecuencias en la banda de voz (incluyendo la respuesta del teléfono al transmitir y al escuchar), y un capacitor, el cual provee un ajuste que es directamente proporcional a la frecuencia para describir la función de acoplamiento asumida. TIF es una cantidad dimensional indicativa de la forma de onda y no de amplitud y es dado por la ecuación (B.1). [1]

$$\text{TIF} = \sqrt{\sum \left[ \frac{(X_n \cdot W_n)}{X} \right]^2} \quad (\text{B.1})$$

Dónde:

X=Tensión o corriente rms total

X<sub>n</sub>= Frecuencia individual de corriente o tensión rms correspondiente a la frecuencia armónica de orden n

W<sub>n</sub>= Frecuencia individual TIF ponderada a la frecuencia correspondiente para el armónico de orden n

En la práctica, la interferencia telefónica es a menudo expresada como un producto de la corriente y el TIF, es decir, el producto de I.T, donde la I es amperios rms y T es TIF como se calculó en la ecuación (B.1). Alternativamente, esto es algunas veces expresado como un producto de la tensión y la ponderación de TIF, donde la tensión es en KV rms, esto es, el producto de KV-T. La sola ponderación de valores de frecuencia, basada en la vieja ponderación de mensaje C de 1960, es listada en la Tabla B-1. La interpolación lineal puede ser usada de ser necesario en la Tabla B-1. [1]

Tabla B-1—Valores de ponderación ( $W_f$ )

FRECUENCIA	$W_f$	FRECUENCIA	$W_f$	FRECUENCIA	$W_f$	FRECUENCIA	$W_f$
60	0,5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3300	8090
360	400	1260	6050	2160	9080	3540	6730
420	650	1380	6370	220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6560	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10600	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10210	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9820	5000	840
1000	5000						

### B.1 Lineamientos para el producto I-T

La tabla B-2 proporciona pautas representativas de I-T para sistemas de distribución operando a tensiones menores que (o igual a) 34.5kV donde es más probable tener el uso conjunto de instalaciones, particularmente soportes y estructuras, incluyendo compañías de potencia eléctrica, telefónica y comunicaciones. Estos lineamientos podrían no ser considerados como límites recomendados debido al amplio rango de variabilidad en sistemas y compatibilidad de equipos que es encontrado en la práctica. El uso de categorías es para fines ilustrativos solamente y es el de proporcionar el evento deseable para evaluar o comparar potenciales de interferencia en múltiplos de un sistema eléctrico particular. [1]

Tabla B-2—I-T Lineamientos para sistemas de distribución<sup>a</sup>

Categoría	Definición	I-T
I	Niveles mas improbables que causan interferencia	Hasta 10 000 <sup>b</sup>
II	Niveles que podrian causar interferencia	Arriba de 10 000 hasta 25 000
II	Niveles que provablemente causen interferencia	Mayor a 25 000

<sup>a</sup> Los valores del producto de I-T son para circuitos con una exposición entre el sistema aéreo tanto de potencia como de teléfono. Dentro de una planta industrial o un edificio comercial, la exposición entre los cables eléctricos de distribución de potencia y líneas telefónicas con pares trenzados son extremadamente bajos y normalmente se encuentra sin interferencia; el uso de cables de fibra óptica para comunicaciones elimina virtualmente toda la preocupación.

<sup>b</sup> Para algunas áreas que usan un retorno a tierra ya sea para teléfono o circuitos de potencia, este valor puede ser tan bajo como 1500.

## Anexo C

(Informativo)

### Límites en las muescas de conmutación

#### C.1 Límites recomendados en las muescas de conmutación

La profundidad de muesca y el área de muesca de la tensión de línea a línea en el PCC deben limitarse como se muestra en la Tabla C-1.

Tabla C-1—Límites recomendados en las muescas de conmutación

	Aplicaciones especiales	Sistema general	Sistema dedicado
Profundidad de muesca	10%	20%	50%
Area de muesca	16400	22800	36500

<sup>a</sup> Aplicaciones especiales incluyen hospitales y aeropuertos.

<sup>b</sup> Un sistema dedicado exclusivamente suministra una carga de usuarios o usuario específico.

<sup>d</sup> Los valores de  $A_N$  han sido desarrollados para sistemas de 480 V. Es necesario multiplicar los valores dados por  $V/480$  para su aplicación en todas las demás tensiones.

Se recomiendan estos límites para sistemas de baja tensión en el que el área de la muesca se mide fácilmente en un osciloscopio o monitor de calidad de energía con capacidad de osciloscopio. En el caso de que la medición directa no sea posible, las simulaciones detalladas que incluyen modelos avanzados del sistema de suministro de energía y cargas, pueden proporcionar formas de onda aproximadas que pueden ser usadas en lugar de las mediciones del osciloscopio. Las variables relevantes para su uso en la Tabla C-1 se definen en la Figura C-1. [1]

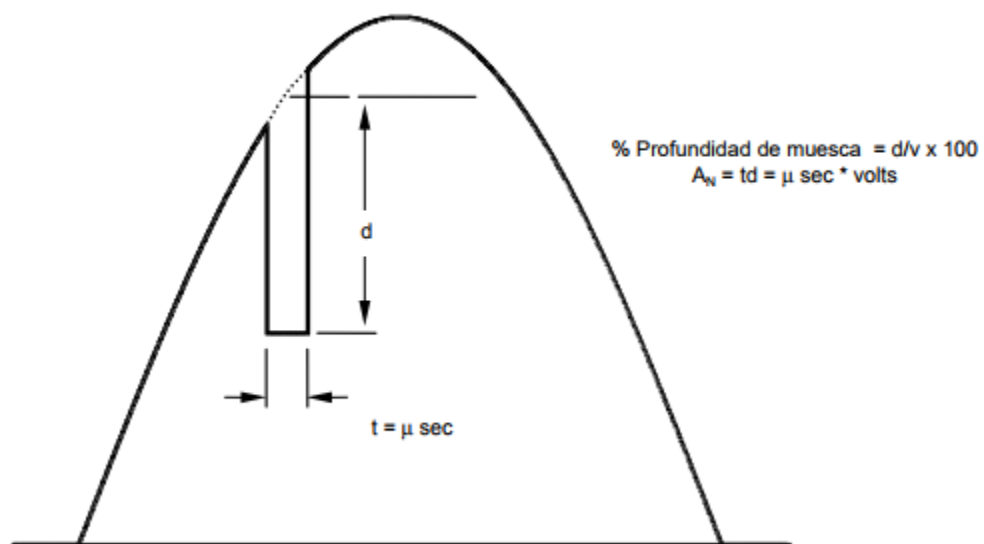


Figura C-1—Definición de profundidad de muesca y área de muesca

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1.Procedimientos para el estudio y análisis de armónicos**

Hasta ahora no existe un procedimiento normativo que especifique un orden específico para realizar el diagnóstico de armónicos en las redes eléctricas, por lo que, se buscó entender y realizar la traducción del estándar IEEE 519-2014 que menciona algunas prácticas recomendadas para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia, señalando ciertos niveles aceptables de distorsión armónica.

De este modo, se seleccionó un método general dispuesto por Circutor, empresa dedicada a crear soluciones innovadoras para la mejora de la eficiencia energética “Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas”

Para dicho fin, se apoya en el diagrama de flujo establecido por Circutor, donde recomienda principalmente obtener el diagrama unifilar de la red, como también las características del transformador que alimenta la red, la distribución de cargas, definición de los puntos o el punto de medida según sea necesario, los niveles de demanda y las horas de mayor consumo.

Las mediciones se realizan con el analizador de redes de calidad de energía Fluke 434, y luego se documentan los resultados y se comparan los límites para verificar la presencia de los armónicos.

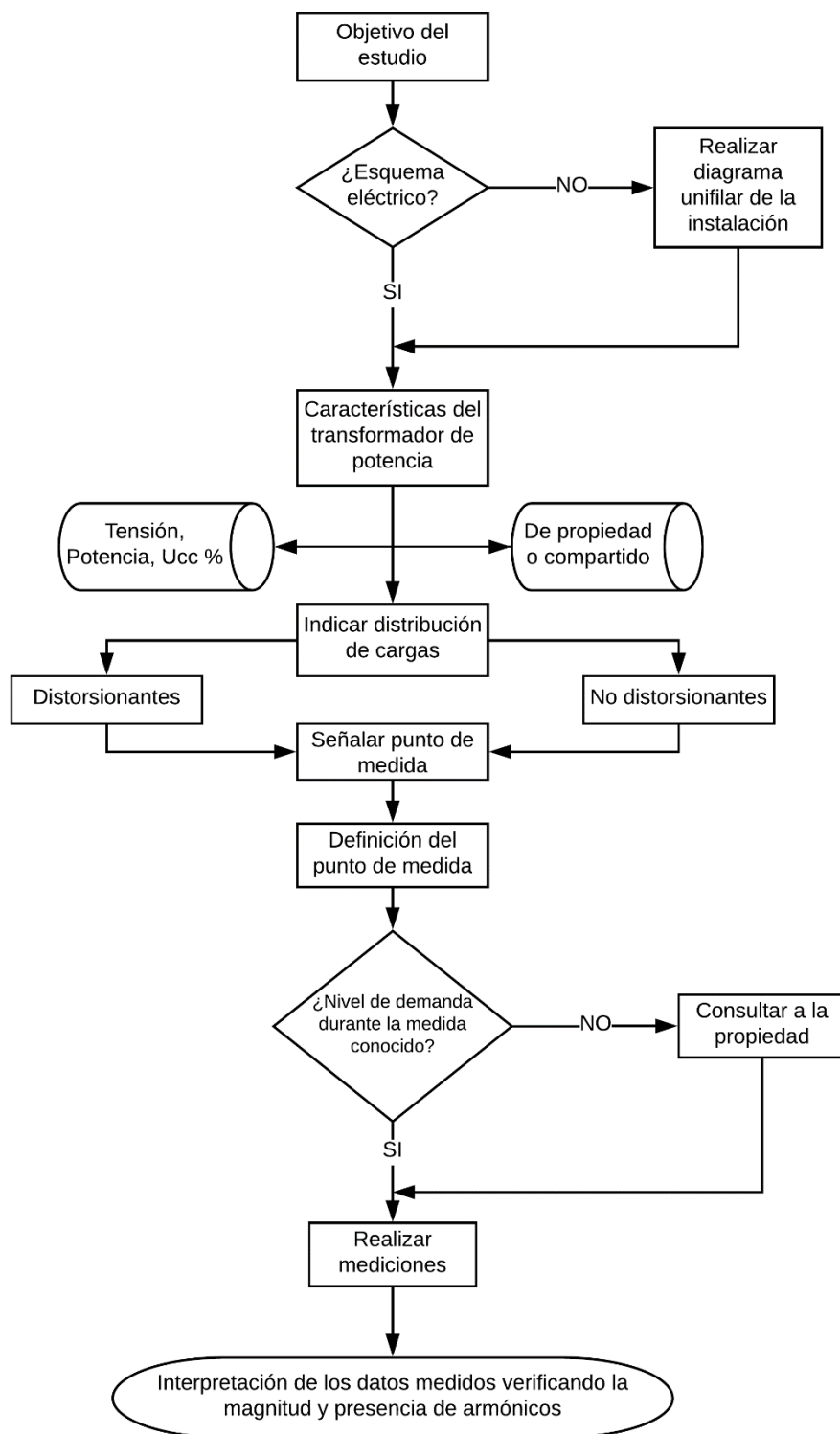


Figura 1. Diagrama de flujo para realizar el análisis. [3]

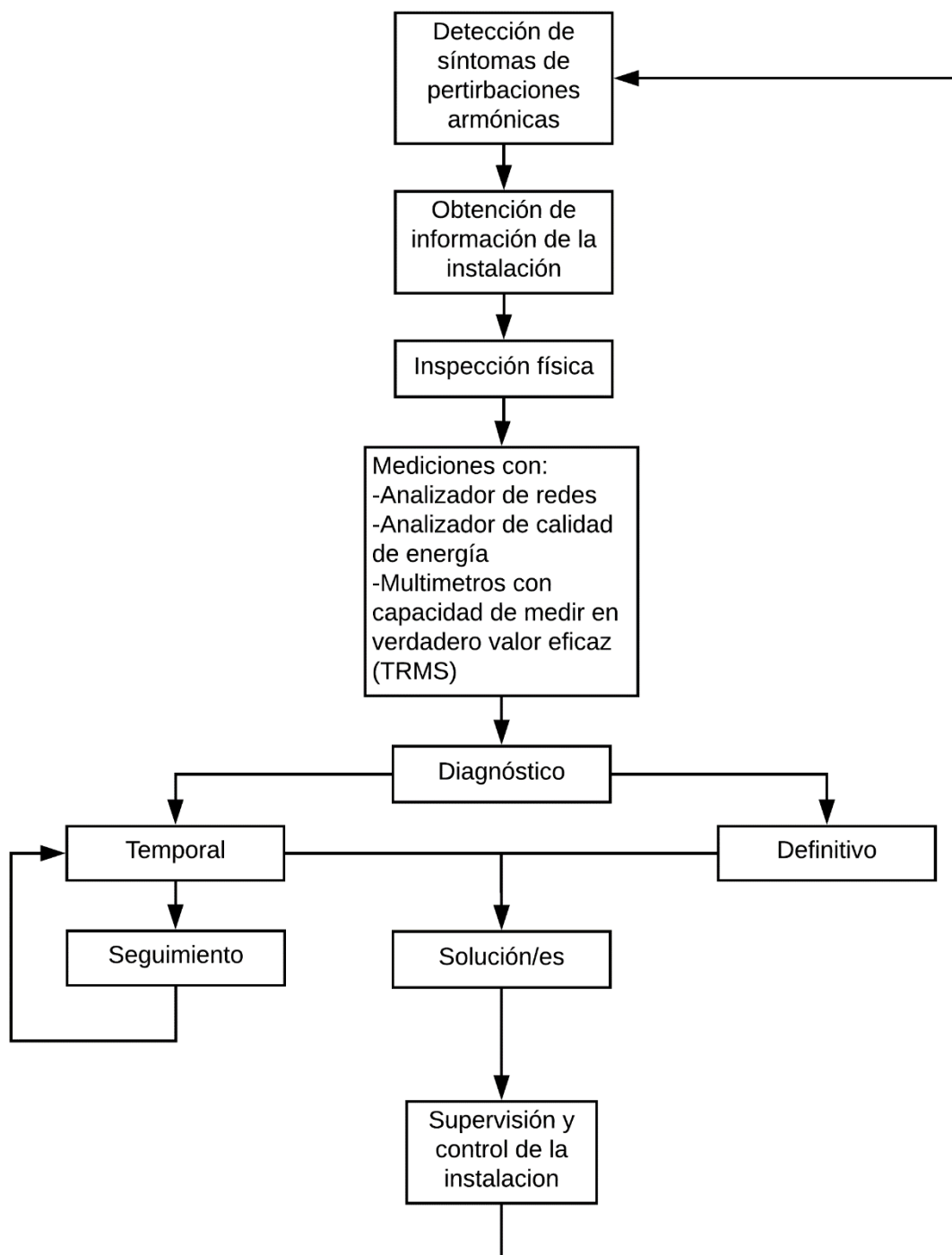


Figura 2. Diagrama de flujo para diagnosticar la instalación. [3]

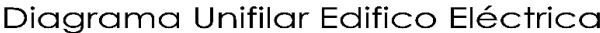
## 6. PROCEDIMIENTO PARA VERIFICAR LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS EN LA SUBESTACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

El estudio es realizado en la subestación de la facultad de eléctrica en la universidad tecnológica de Pereira, ubicado en el laboratorio de máquinas.

## 6.1.Objetivo

Verificar la presencia de los niveles de distorsión armónica en la red de baja tensión con el analizador de calidad de energía FLUKE 434.

## 6.2.Diagrama unifilar





### 6.3.Características del transformador de potencia

Celda de transformación trifásica 112.5 KVA, 13200/208, 120 V Y  $U_{cc}= 4\%$ , Corriente de corto circuito 7.2 KA

## Short Circuit Calculation

### Transformer F.L.A.

Type: **3F**  
 Rated Power: **112,5** kVA  
 Rated Voltage (Sec.): **208** V  
 FLA: 312,28 A

$$I_{FLA3\phi} = \frac{kVA \cdot 1000}{E_{LL} \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{FLA1\phi} = \frac{kVA \cdot 1000}{E_{LL}}$$

### Multiplier

Z Transformer: **4** %  
 Multiplier: 25,00

$$Multiplier = \frac{100}{\%Z}$$

### Short-circuit current

Isc: 7806,95 A

$$I_{SC} = I_{FLA} \cdot Multiplier$$

### "f" factor

Fault type: **3F**  
 Conductor type: **Cu**  
 Conductor Size: **250** kcmil  
 Conductor configuration: **Three Single Conductor**  
 Type of installation: **Steel**  
 Insulation level: **600** V  
 "C" factor: 16483  
 Length of conductor (L): **10** ft  
 Conductors per fase (n): **3**  
 "f" factor: 0,0131

$$f_{3\phi} = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I_{SC}}{C \cdot n \cdot E_{LL}}$$

$$f_{1\phi_{LL}} = \frac{2 \cdot L \cdot I_{SC}}{C \cdot n \cdot E_{LL}}$$

$$f_{1\phi_{Ln}} = \frac{2 \cdot L \cdot I_{SC}}{C \cdot n \cdot E_{Ln}}$$

### "M" Multiplier

M: 0,987024141

$$M = \frac{1}{1+f}$$

### Symmetrical short circuit current (RMS)

Isc.sym.RMS = **7705,65** A

$$I_{SC, sym, RMS} = I_{SC} \cdot M$$

Figura 5. Calculo nivel de cortocircuito

## 6.4. Nivel de trabajo o demanda durante la medida

Se tomaron medidas en un periodo de 3 días y medio de alrededor de 4 a 8 horas diarias en intervalos de 5 segundos, esto con el fin de tener una muestra significativa de la red bajo estudio para realizar un mejor análisis.

### 6.4.1. Mediciones martes 17 de abril

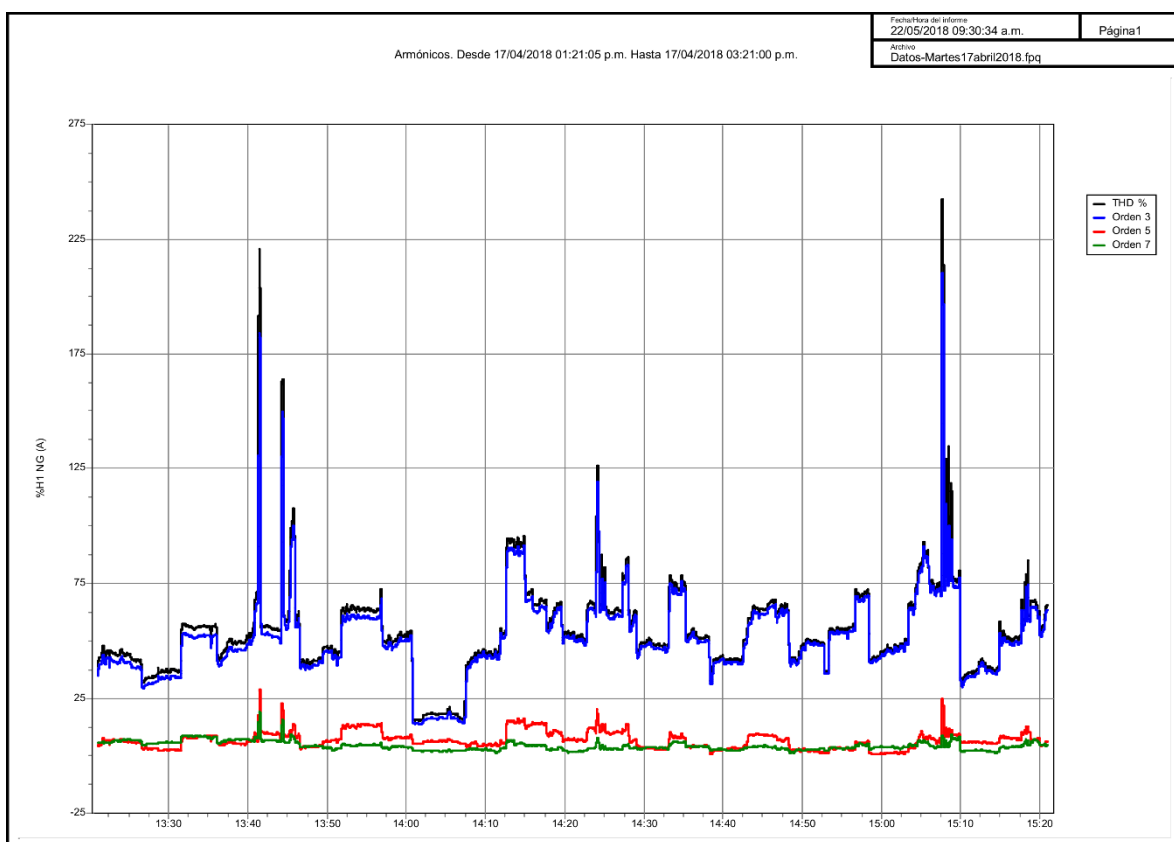


Figura 6. Evolución temporal de las componentes armónicas de corriente y el THDi en el neutro del día martes en la tarde.

De la figura anterior, se observa que en el neutro el THDi es aproximadamente igual a la componente armónica de tercer orden, esto verifica que por el neutro las componentes armónicas predominantes son las de secuencia cero o homopolares de orden múltiplos de 3k, es decir 3,5,15,21, como con anterioridad se conocía que este fenómeno iba estar presente principalmente para el armónico de orden 3, solo se tomaron mediciones hasta el armónico de orden 7.

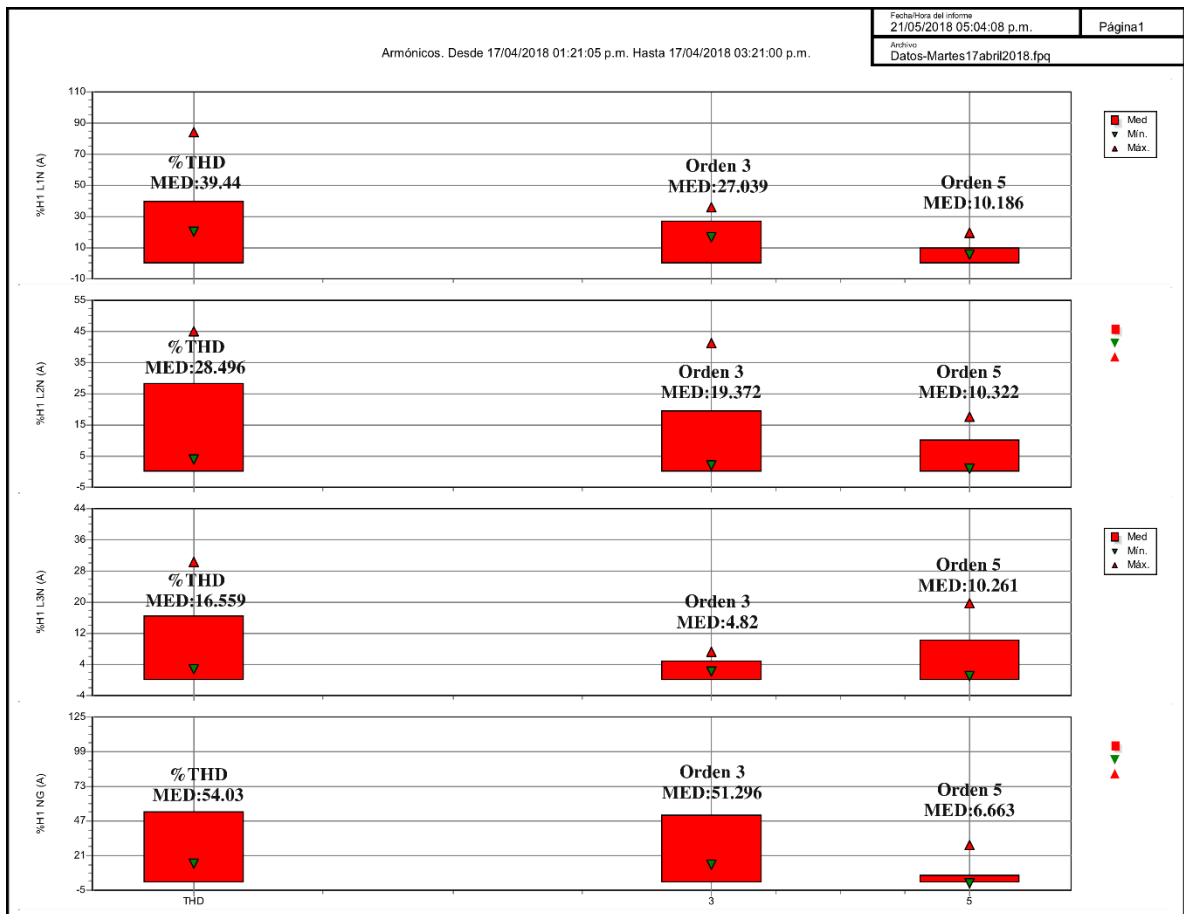


Figura 7. Histograma de las componentes armónicas de corriente y el THDi en las fases y el neutro del día martes.

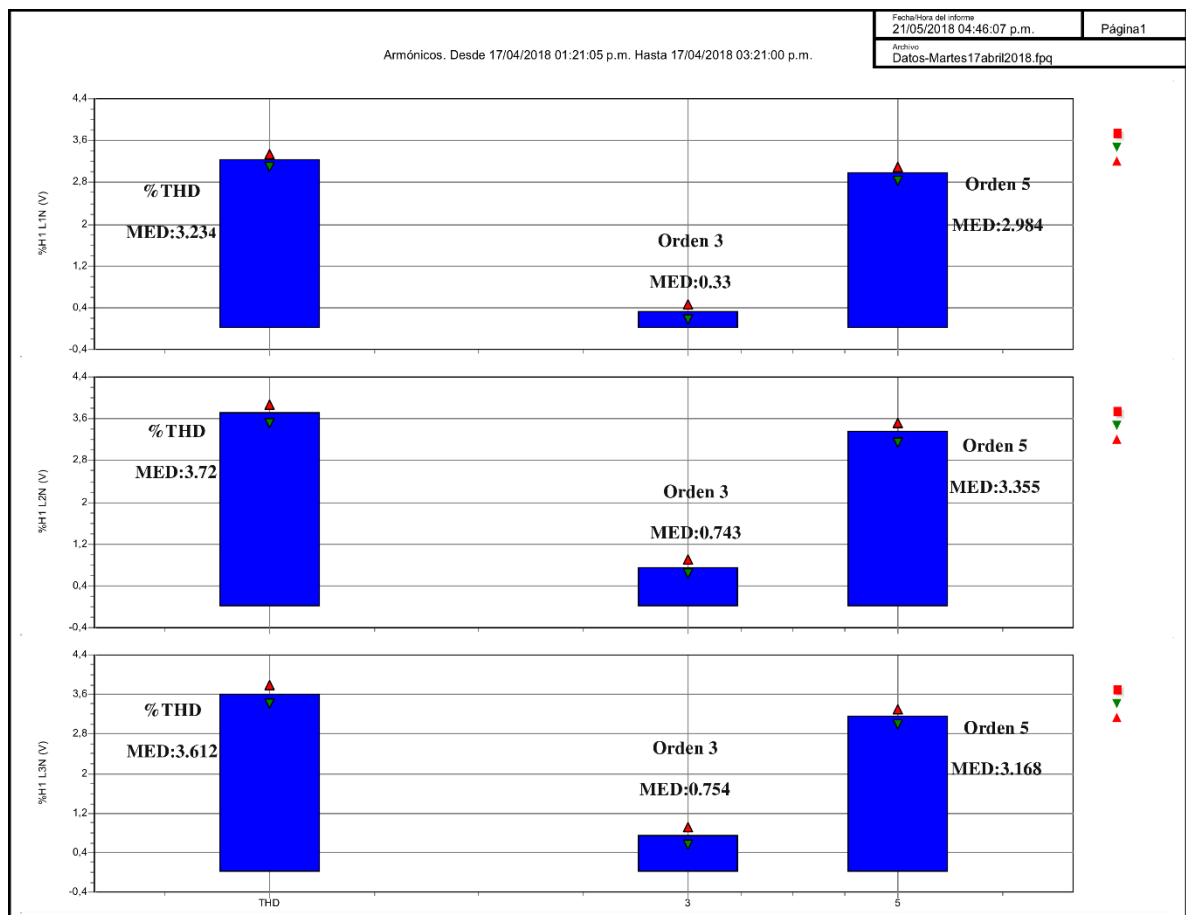


Figura 8. Histograma de las componentes armónicas de tensión y el THDv en las fases del día martes.

Resumen							
Tabla							
Tensión y corriente							
Estadísticas							
Frecuencia / Desequilibrio							
Potencia							
Pantallas							
Armónicos							
Filtro							
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Med	L2N(V) / L2(A) Med	L3N(V) / L3(A) Med	LNG(V) / N(A) Med		
17/04/2018 02:01:50 p.m. 0mseg	Tensión	119,71 V	118,65 V	120,65 V	0,1 V		
17/04/2018 02:01:50 p.m. 0mseg	Corriente	6,88 A	37,38 A	9,56 A	27,8 A		
17/04/2018 02:01:50 p.m. 0mseg	THD V	3,18%	3,66%	3,57%	194,54%		
17/04/2018 02:01:50 p.m. 0mseg	THD A	36,58%	5,46%	19,38%	15,39%		

Figura 9. Tabla de corrientes en para el caso en el que el THDi fue mínimo en el neutro en el periodo de tiempo del martes.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
Filtro							
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Med	L2N(V) / L2(A) Med	L3N(V) / L3(A) Med	LNG(V) / N(A) Med		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	Tensión	119,88 V	119 V	121,26 V	0,09 V		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	Corriente	7,11 A	15,53 A	7,77 A	4,6 A		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	THD V	3,26%	3,78%	3,65%	246,53%		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	THD A	31,01%	16,77%	27,16%	242,12%		

Figura 10. Tabla de corrientes en para el caso en el que el THDi fue máximo en el neutro en el periodo de tiempo del martes.

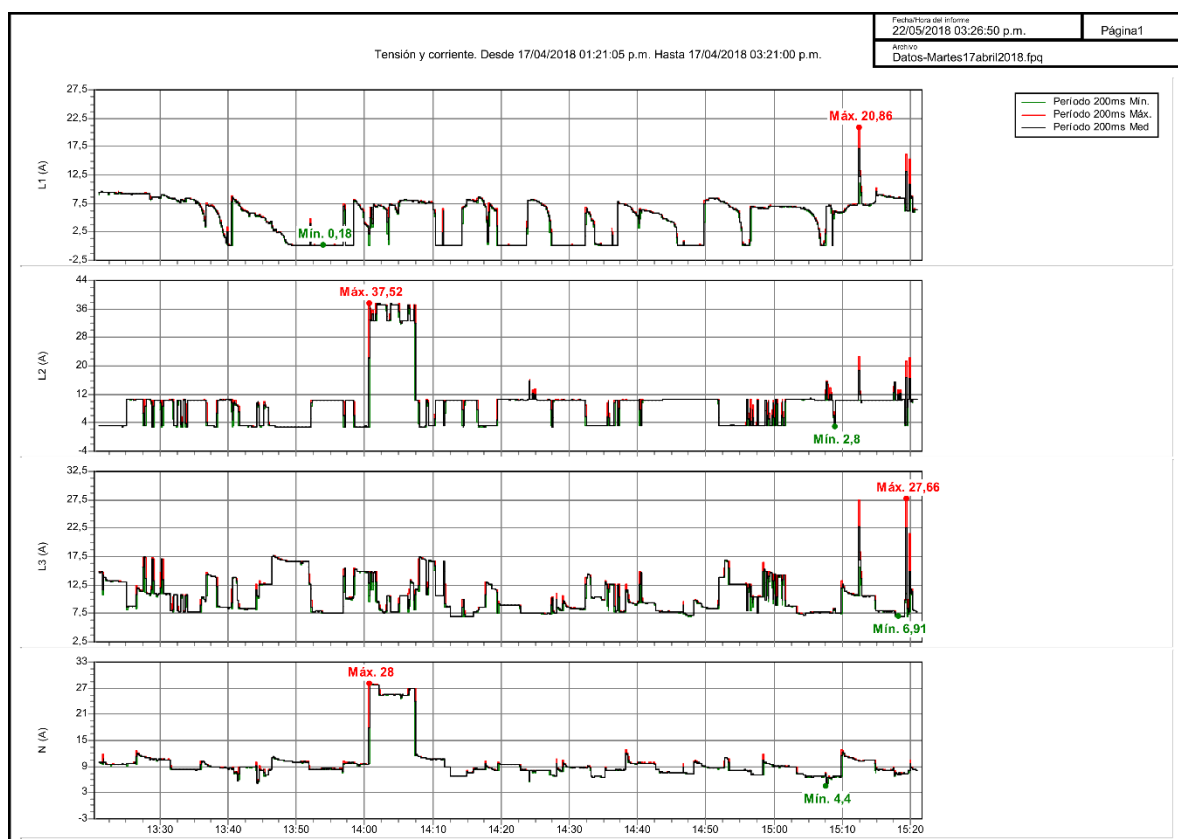


Figura 11. Corriente rms en las fases y en el neutro en el periodo de tiempo del martes 17 de abril.

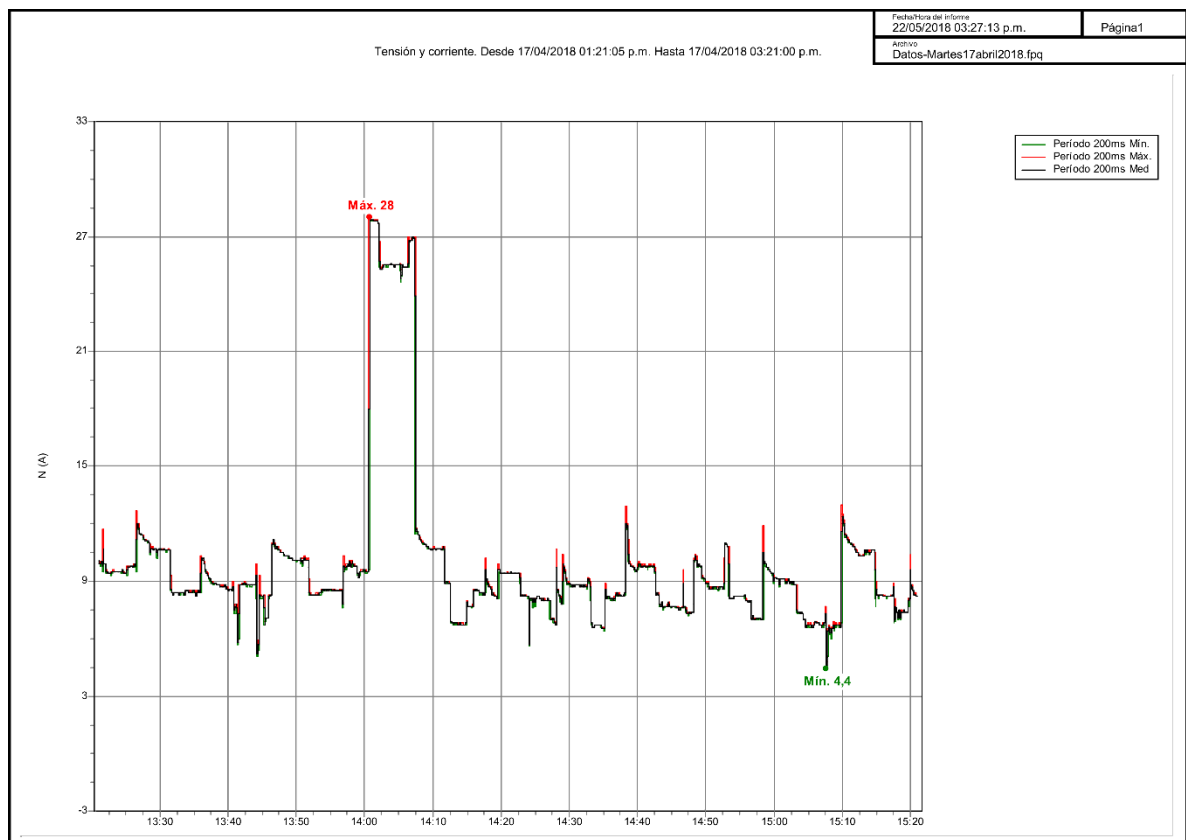


Figura 12. Corriente rms en el neutro máxima en el periodo de tiempo del martes 17 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
<input checked="" type="checkbox"/> Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input type="checkbox"/> Mín. <input type="checkbox"/> Me
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.		
17/04/2018 02:00:50 p.m. 0mseg	Tensión	119,94 V	118,86 V	120,77 V	0,1 V		
17/04/2018 02:00:50 p.m. 0mseg	Corriente	3,15 A	37,52 A	11,59 A	28 A		
17/04/2018 02:00:50 p.m. 0mseg	THD V	3,21%	3,61%	3,54%	196,91%		
17/04/2018 02:00:50 p.m. 0mseg	THD A	63,06%	5,35%	19,11%	16,01%		

Figura 13. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue máxima en el periodo de tiempo del martes 17 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
<input checked="" type="checkbox"/> Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input checked="" type="checkbox"/> Mín. <input type="checkbox"/> M
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Mín.	L2N(V) / L2(A) Mín.	L3N(V) / L3(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Mín.		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	Tensión	119,87 V	118,95 V	121,24 V	0,09 V		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	Corriente	7,06 A	15,49 A	7,74 A	4,4 A		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	THD V	3,25%	3,76%	3,64%	233,67%		
17/04/2018 03:07:45 p.m. 0mseg	THD A	30,66%	15,98%	26,98%	232,79%		

Figura 14. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue mínima en el periodo de tiempo del martes 17 de abril.

#### 6.4.2. Mediciones miércoles 19 de abril

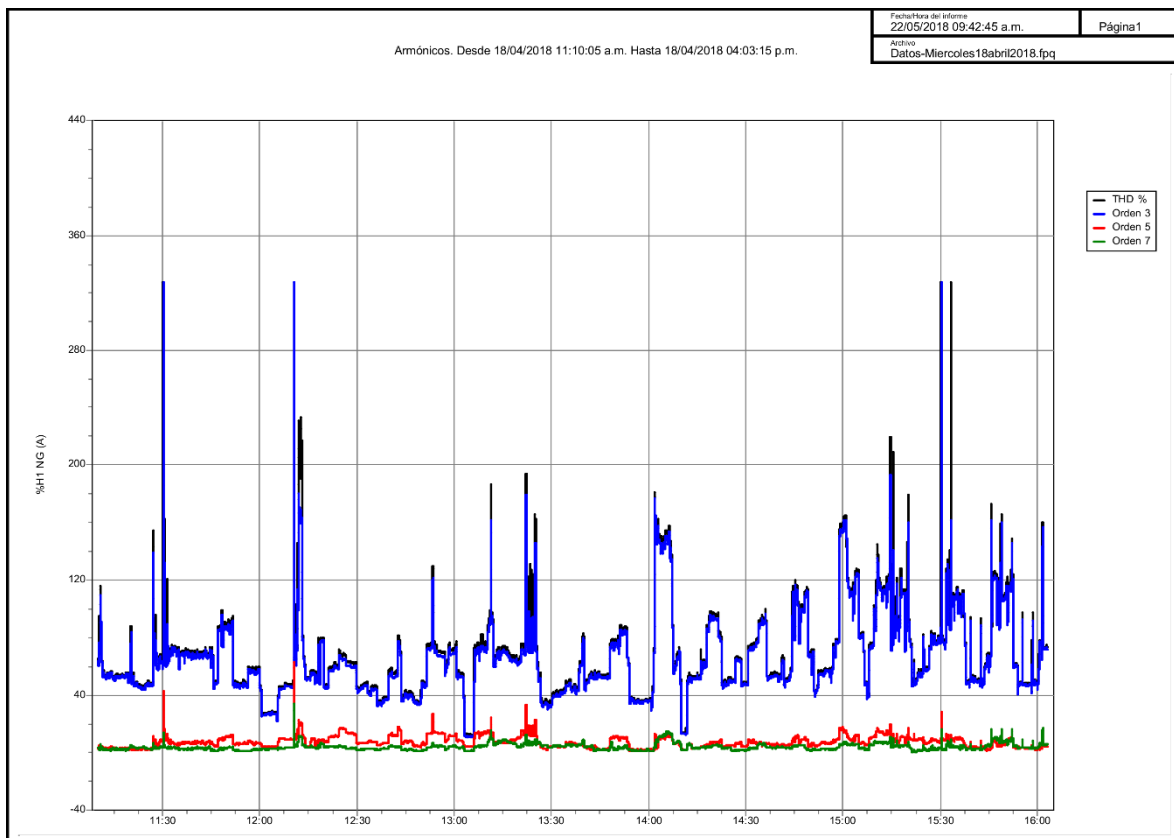


Figura 15. Evolución temporal de las componentes armónicas de corriente y el THDi en el neutro del día miércoles.

De la figura anterior, se observa que en el neutro el THDi es aproximadamente igual a la componente armónica de tercer orden, esto verifica que por el neutro las componentes armónicas predominantes son las de secuencia cero o homopolares de orden múltiplos de 3k, es decir 3,5,15,21, como con anterioridad se conocía que este fenómeno iba estar presente principalmente para el armónico de orden 3, solo se tomaron mediciones hasta el armónico de orden 7.



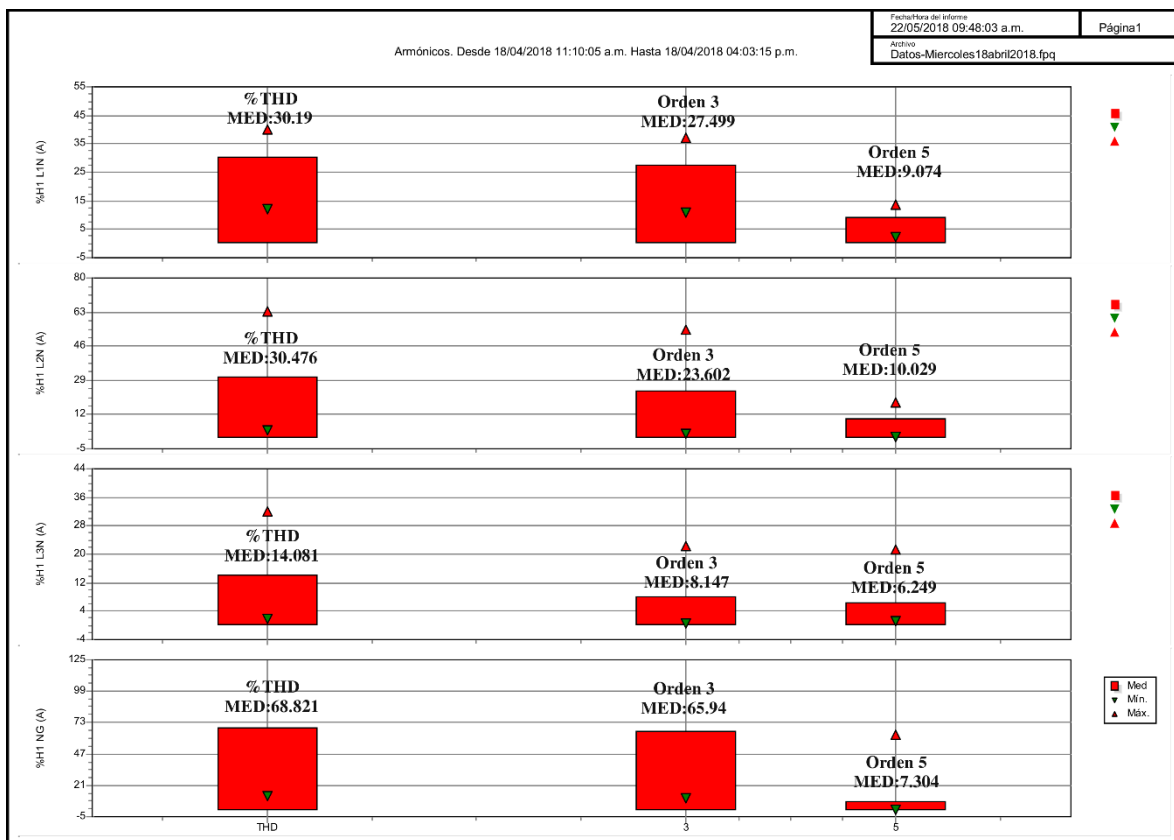


Figura 16. Histograma de las componentes armónicas de corriente y el THDi en las fases y el neutro del día miércoles.

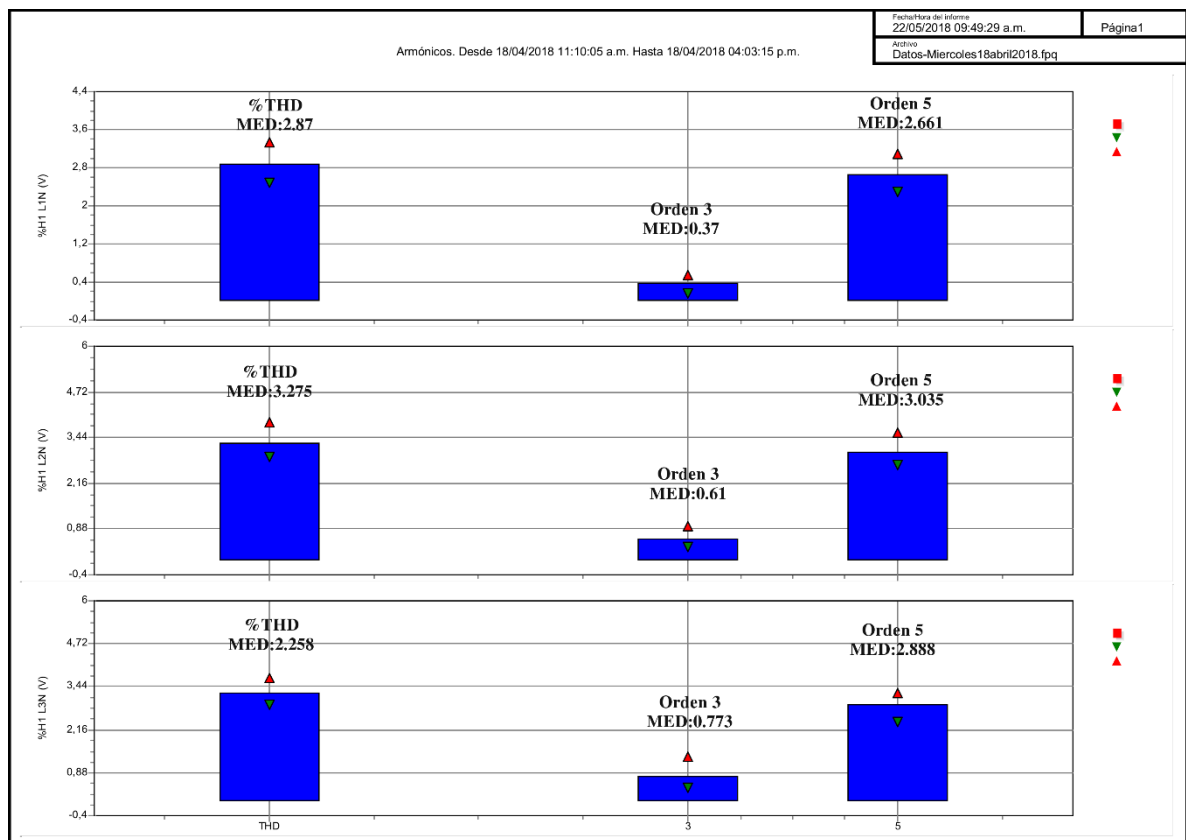


Figura 17. Histograma de las componentes armónicas de tensión y el THDv en las fases del día miércoles.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
Filtro		Duración					
		<input type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A) <input type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A) <input type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A) <input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A) <input type="checkbox"/> Total					
Fecha	Función	LNG(V) / N(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Med	LNG(V) / N(A) Máx.			
18/04/2018 01:05:50 p.m. 0mseg	Tensión	0,09 V	0,09 V	0,09 V			
18/04/2018 01:05:50 p.m. 0mseg	Corriente	30,3 A	30,4 A	30,4 A			
18/04/2018 01:05:50 p.m. 0mseg	THD V	170,67%	170,98%	171,45%			
18/04/2018 01:05:50 p.m. 0mseg	THD A	11,95%	12,05%	12,2%			

Figura 18. Tabla de corrientes en para el caso en el que el THDi fue mínimo en el neutro en el periodo de tiempo del miércoles.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
Filtro		Duración					
		<input type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A) <input type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A) <input type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A) <input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A) <input type="checkbox"/> Total					
Fecha	Función	LNG(V) / N(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Med	LNG(V) / N(A) Máx.			
18/04/2018 11:30:25 a.m. 0mseg	Tensión	0,1 V	0,1 V	0,1 V			
18/04/2018 11:30:25 a.m. 0mseg	Corriente	5,8 A	6,8 A	8,1 A			
18/04/2018 11:30:25 a.m. 0mseg	THD V	182,83%	191,35%	197,03%			
18/04/2018 11:30:25 a.m. 0mseg	THD A	327,67%	327,67%	327,67%			

Figura 19. Tabla de corrientes en para el caso en el que el THDi fue máximo en el neutro en el periodo de tiempo del miércoles.



Figura 20. Corriente rms en las fases y en el neutro en el periodo de tiempo del miércoles 18 de abril.

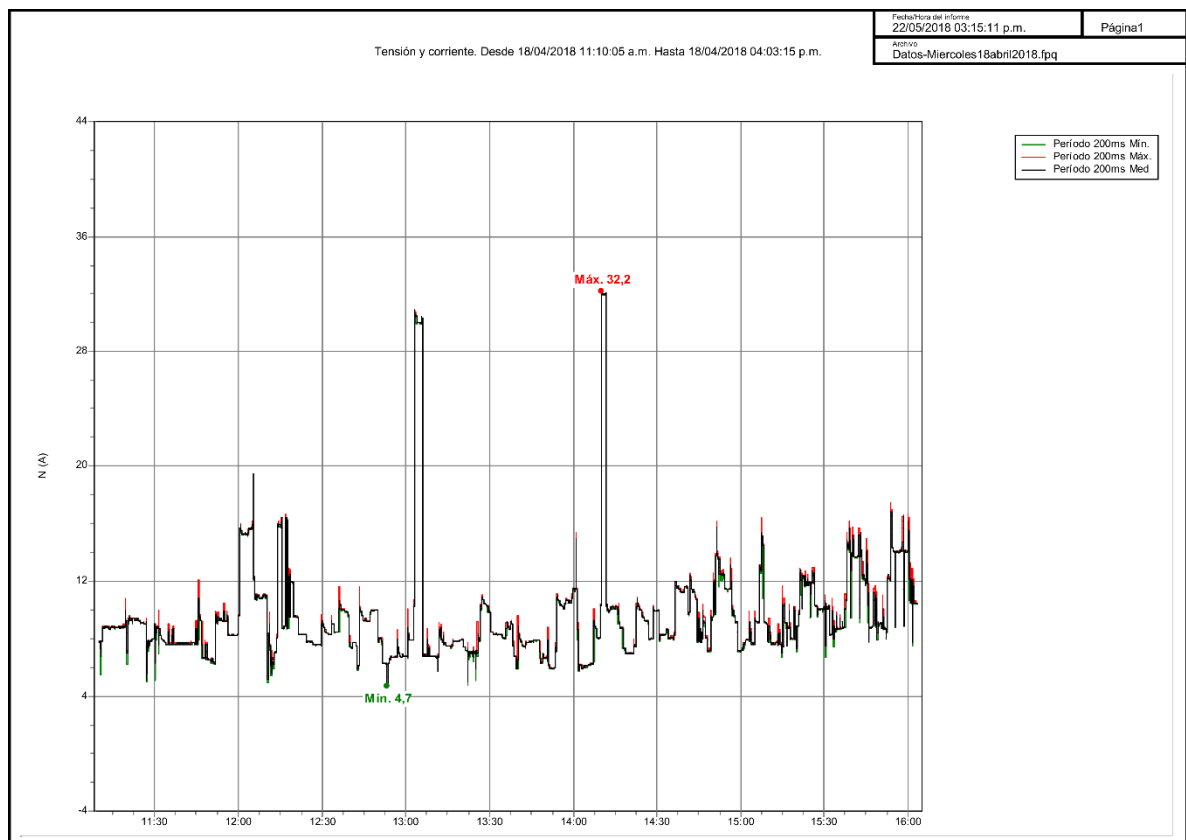


Figura 21. Corriente rms en el neutro en el periodo de tiempo del miércoles 18 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
<input checked="" type="checkbox"/> Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input type="checkbox"/> Mín. <input type="checkbox"/> Máx.
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.		
18/04/2018 02:10:10 p.m. 0mseg	Tensión	123,58 V	122,99 V	124,03 V	0,1 V		
18/04/2018 02:10:10 p.m. 0mseg	Corriente	7,79 A	41,31 A	8,92 A	32,2 A		
18/04/2018 02:10:10 p.m. 0mseg	THD V	2,81%	3,18%	3,13%	191,76%		
18/04/2018 02:10:10 p.m. 0mseg	THD A	34,65%	4,54%	14,84%	13,69%		

Figura 22. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue máxima en el periodo de tiempo del miércoles 18 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
<input checked="" type="checkbox"/> Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input checked="" type="checkbox"/> Mín. <input type="checkbox"/> Máx.
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Mín.	L2N(V) / L2(A) Mín.	L3N(V) / L3(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Mín.		
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	Tensión	124,04 V	123,7 V	124,65 V	0,09 V		
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	Corriente	8,81 A	4,38 A	8,71 A	4,7 A		
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	THD V	2,84%	3,2%	3,28%	169,05%		
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	THD A	34,89%	18,97%	2,65%	128,09%		

Figura 23. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue mínima en el periodo de tiempo del miércoles 18 de abril.

### 6.4.3. Mediciones día viernes 20 abril

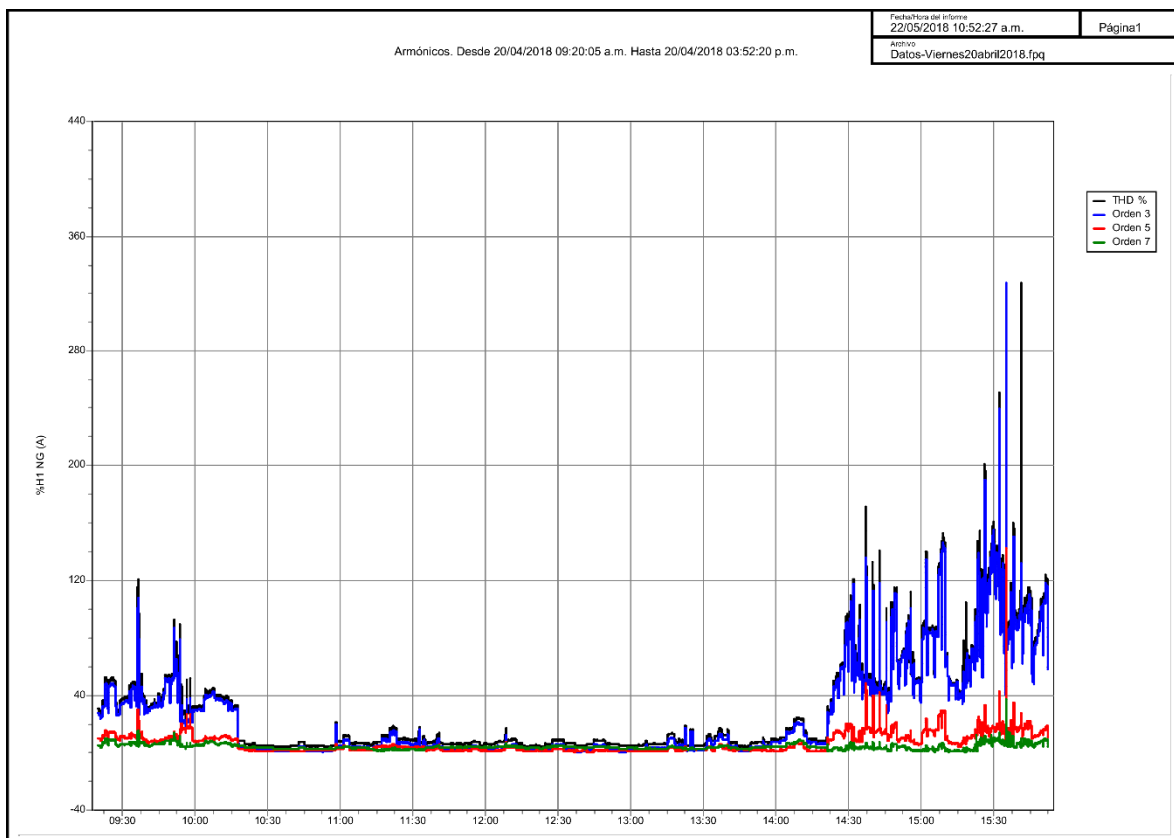


Figura 24. Evolución temporal de las componentes armónicas de corriente y el THDi en el neutro del día viernes 20 de abril.

De la figura anterior, se observa que en el neutro el THDi es aproximadamente igual a la componente armónica de tercer orden, esto verifica que por el neutro las componentes armónicas predominantes son las de secuencia cero o homopolares de orden múltiplos de 3k, es decir 3,5,15,21, como con anterioridad se conocía que este fenómeno iba estar presente principalmente para el armónico de orden 3, solo se tomaron mediciones hasta el armónico de orden 7.

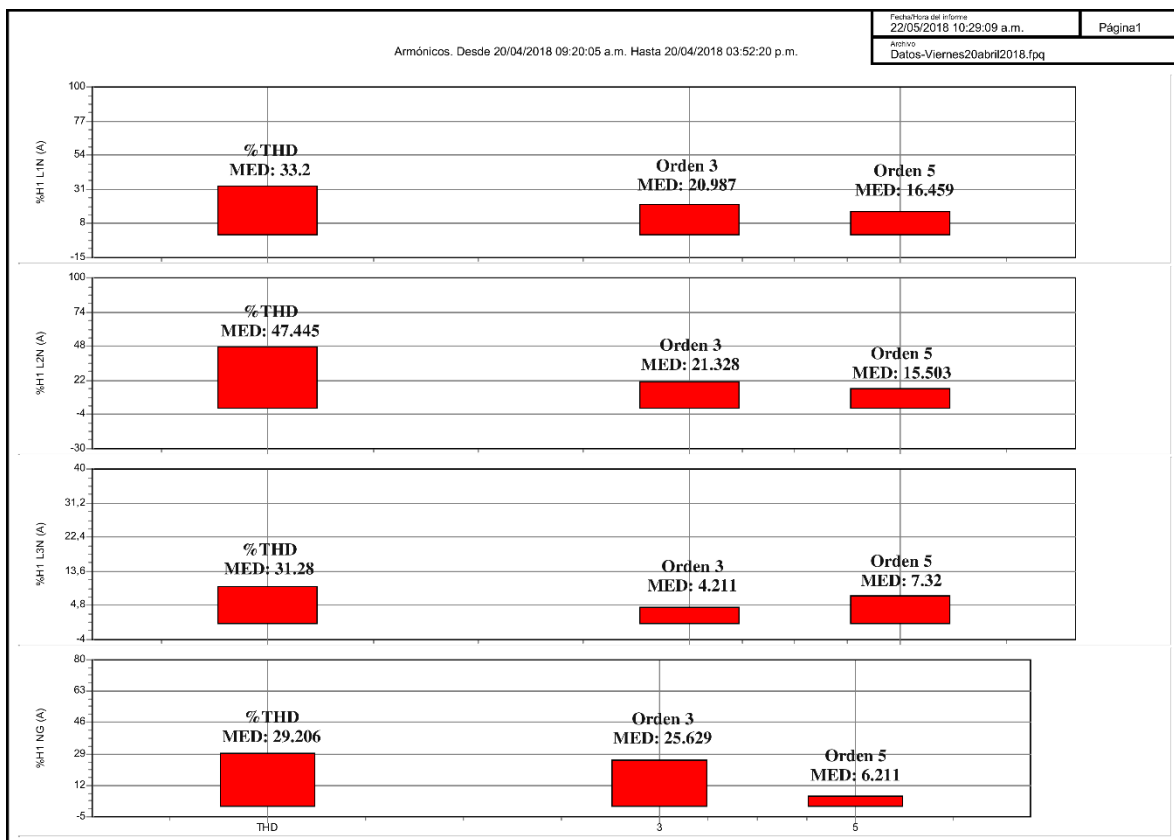


Figura 25. Histograma de las componentes armónicas de corriente y el THDi en las fases y el neutro del día viernes 20 de abril.

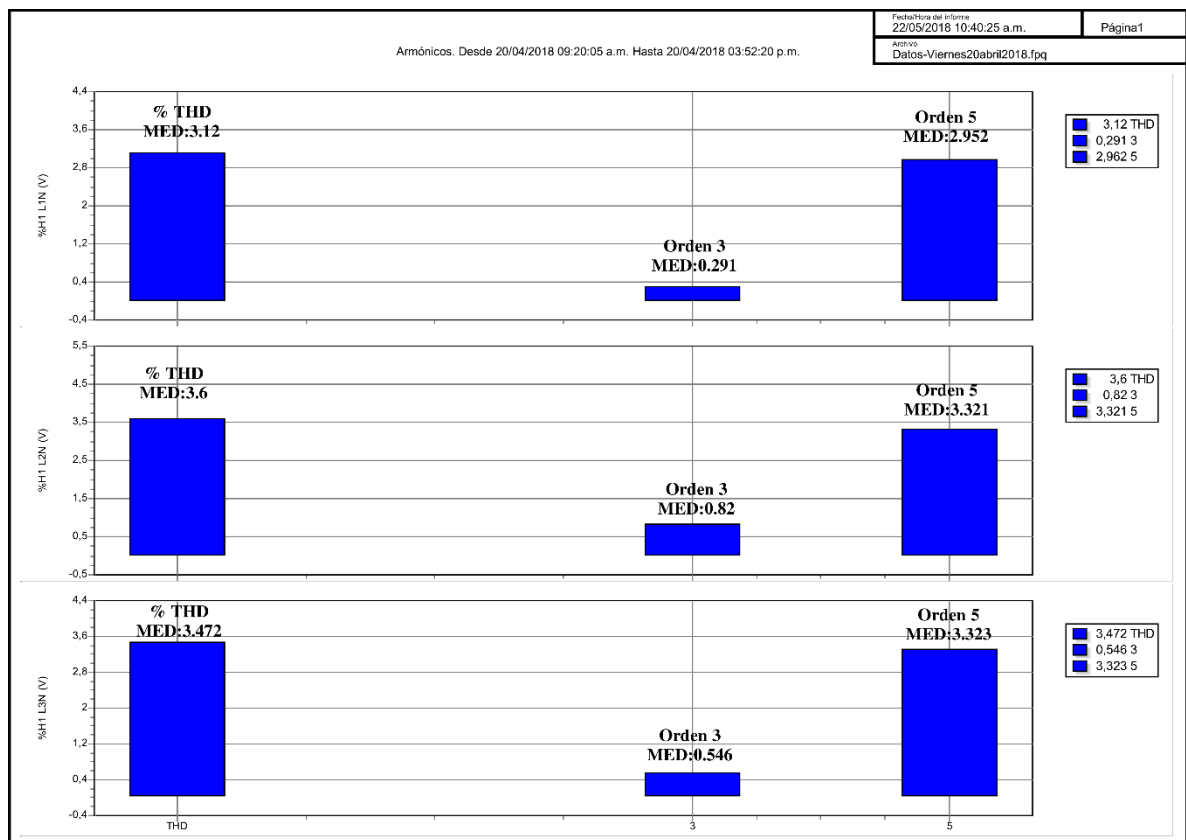


Figura 26. Histograma de las componentes armónicas de tensión y el THDv en las fases del día viernes 20 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Huecos y Picos	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
Filtro	Duración	L1N(V) / L1(A)	L2N(V) / L2(A)	L3N(V) / L3(A)	LNG(V) / N(A)	Total	Mín.	
Fecha	Función	Duración	LNG(V) / N(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Med	LNG(V) / N(A) M			
20/04/2018 12:56:30 p.m. 0mseg	Tensión		0,07 V	0,07 V	0,07 V			
20/04/2018 12:56:30 p.m. 0mseg	Corriente		13,4 A	13,4 A	13,4 A			
20/04/2018 12:56:30 p.m. 0mseg	THD V		165,29%	166%	166,46%			
20/04/2018 12:56:30 p.m. 0mseg	THD A		4,6%	4,64%	4,72%			

Figura 27. Tabla de corrientes en el caso en el que el THDi fue mínimo en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.


Resumen		Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Huecos y Picos	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
 Filtro		<input checked="" type="checkbox"/> Duración	<input type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input checked="" type="checkbox"/> Mín.	<input checked="" type="checkbox"/> Máx.
Fecha	Función	Duración	LNG(V) / N(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Med	LNG(V) / N(A) Máx.				
20/04/2018 03:35:05 p.m. 0mseg	Tensión		0,09 V	0,09 V	0,09 V				
20/04/2018 03:35:05 p.m. 0mseg	Corriente		6,6 A	7,2 A	9,2 A				
20/04/2018 03:35:05 p.m. 0mseg	THD V		327,67%	327,67%	327,67%				
20/04/2018 03:35:05 p.m. 0mseg	THD A		327,67%	327,67%	327,67%				

Figura 28. Tabla de corrientes para el caso en el que el THDi fue máximo en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.

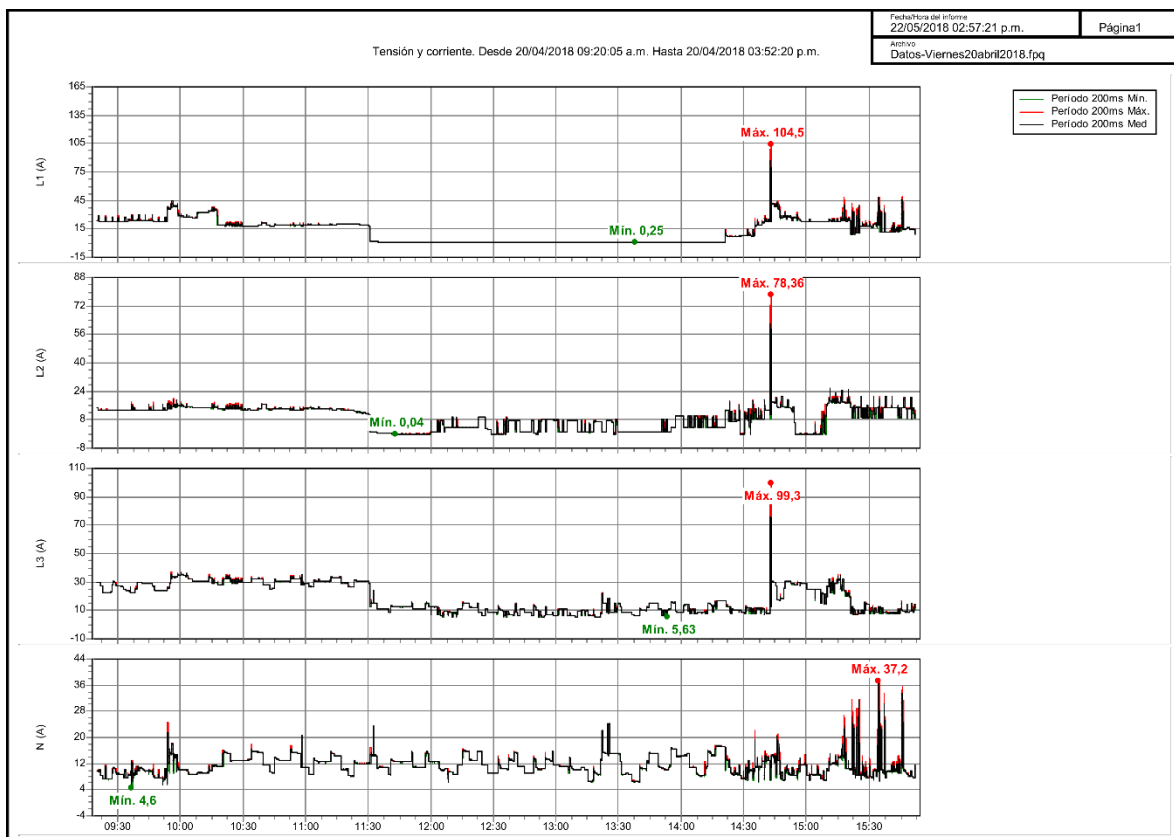


Figura 29. Corriente rms en las fases y en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.



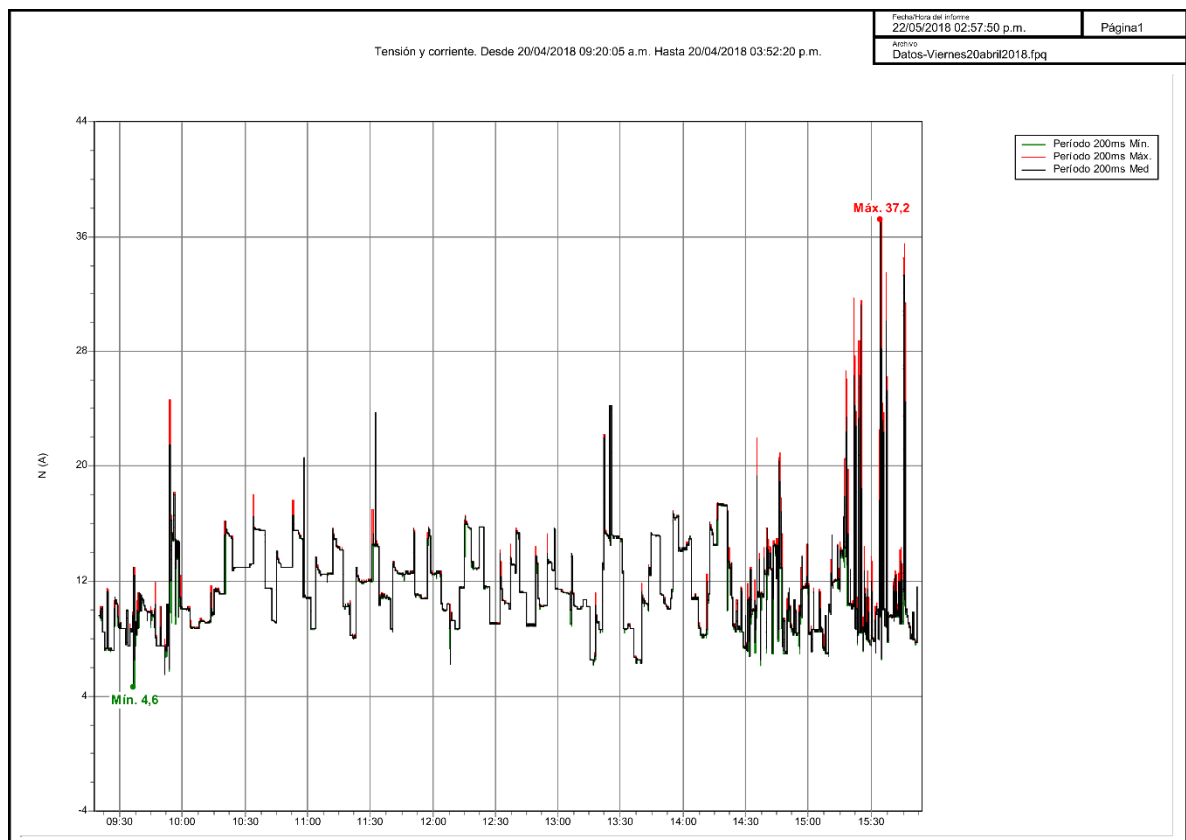


Figura 30. Corriente rms en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Huecos y Picos	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos	
Filtro	<input checked="" type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input type="checkbox"/> Mín.	<input type="checkbox"/> Med	<input checked="" type="checkbox"/> Máx.
Fecha	Función	Duración	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.			
20/04/2018 03:34:50 p.m. 0mseg	Tensión		122,46 V	123,67 V	122,65 V	0,12 V			
20/04/2018 03:34:50 p.m. 0mseg	Corriente		48,33 A	15,16 A	13,04 A	37,2 A			
20/04/2018 03:34:50 p.m. 0mseg	THD V		2,9%	3,73%	3,48%	229,32%			
20/04/2018 03:34:50 p.m. 0mseg	THD A		22,48%	42,97%	21,28%	43,13%			

Figura 31. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue máxima en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.


Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos		
 Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input checked="" type="checkbox"/> Mín.	<input type="checkbox"/> M	
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Mín.		L2N(V) / L2(A) Mín.		L3N(V) / L3(A) Mín.		LNG(V) / N(A) Mín.	
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	Tensión	124,04 V		123,7 V		124,65 V		0,09 V	
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	Corriente	8,81 A		4,38 A		8,71 A		4,7 A	
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	THD V	2,84%		3,2%		3,28%		169,05%	
18/04/2018 12:53:35 p.m. 0mseg	THD A	34,89%		18,97%		2,65%		128,09%	

Figura 32. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue mínima en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.

#### 6.4.4. Mediciones día viernes 27 abril

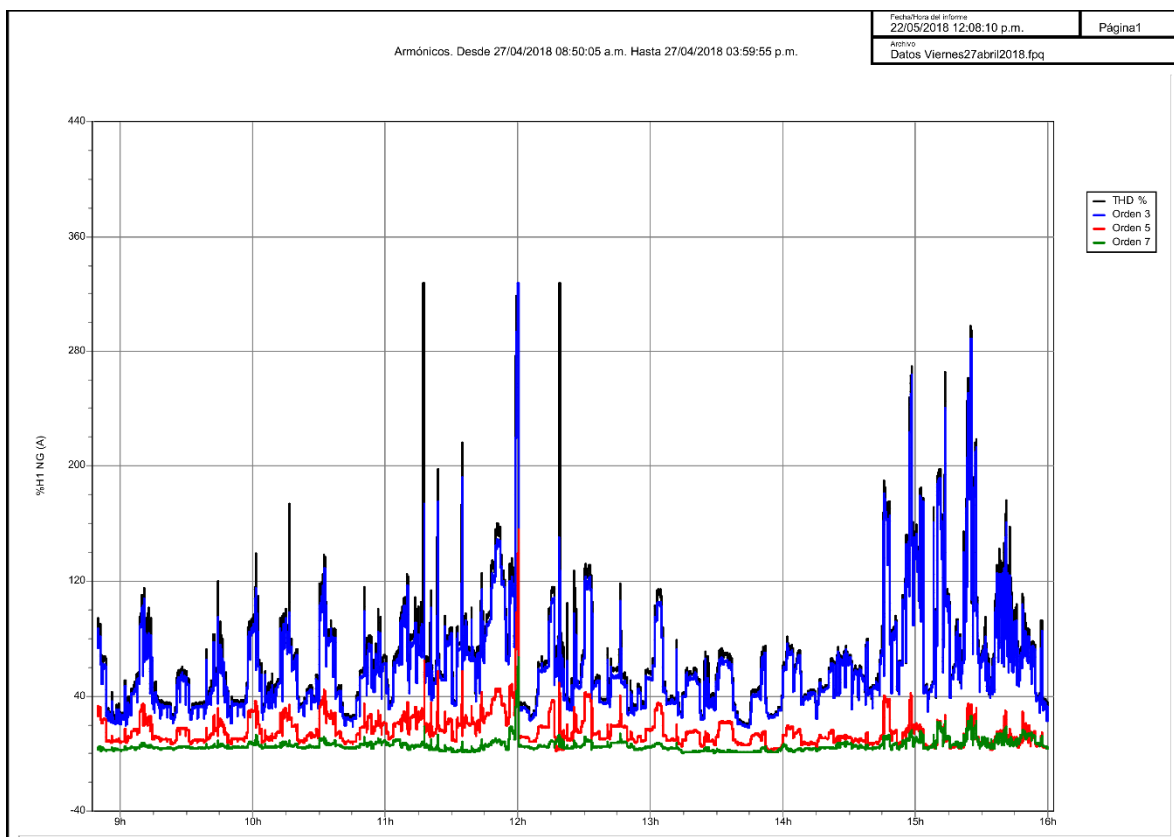


Figura 33. Evolución temporal de las componentes armónicas de corriente y el THDi en el neutro del día viernes 27 de abril.

De la figura anterior, se observa que en el neutro el THDi es aproximadamente igual a la componente armónica de tercer orden, esto verifica que por el neutro las componentes armónicas predominantes son las de secuencia cero o homopolares de orden múltiplos de 3k, es decir 3,5,15,21, como con anterioridad se conocía que este fenómeno iba estar presente principalmente para el armónico de orden 3, solo se tomaron mediciones hasta el armónico de orden 7.

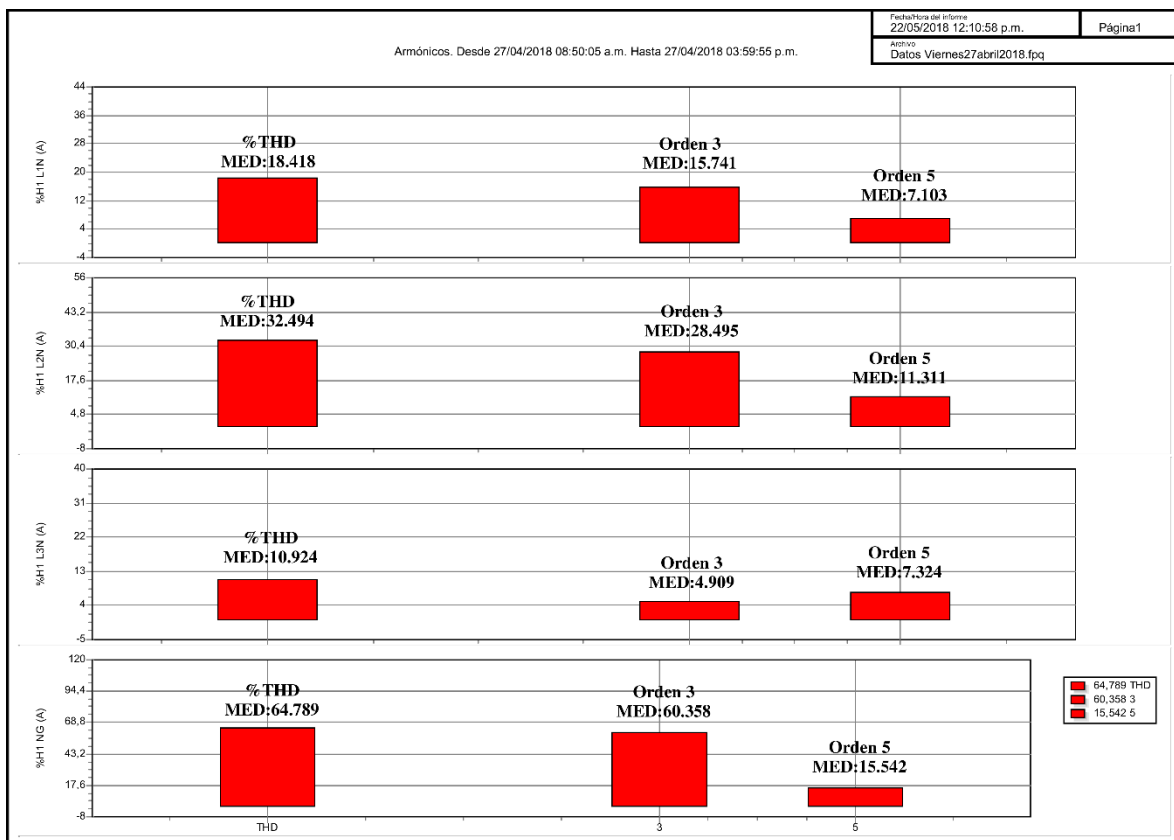


Figura 34. Histograma de las componentes armónicas de corriente y el THDi en las fases y el neutro del día viernes 27 de abril.

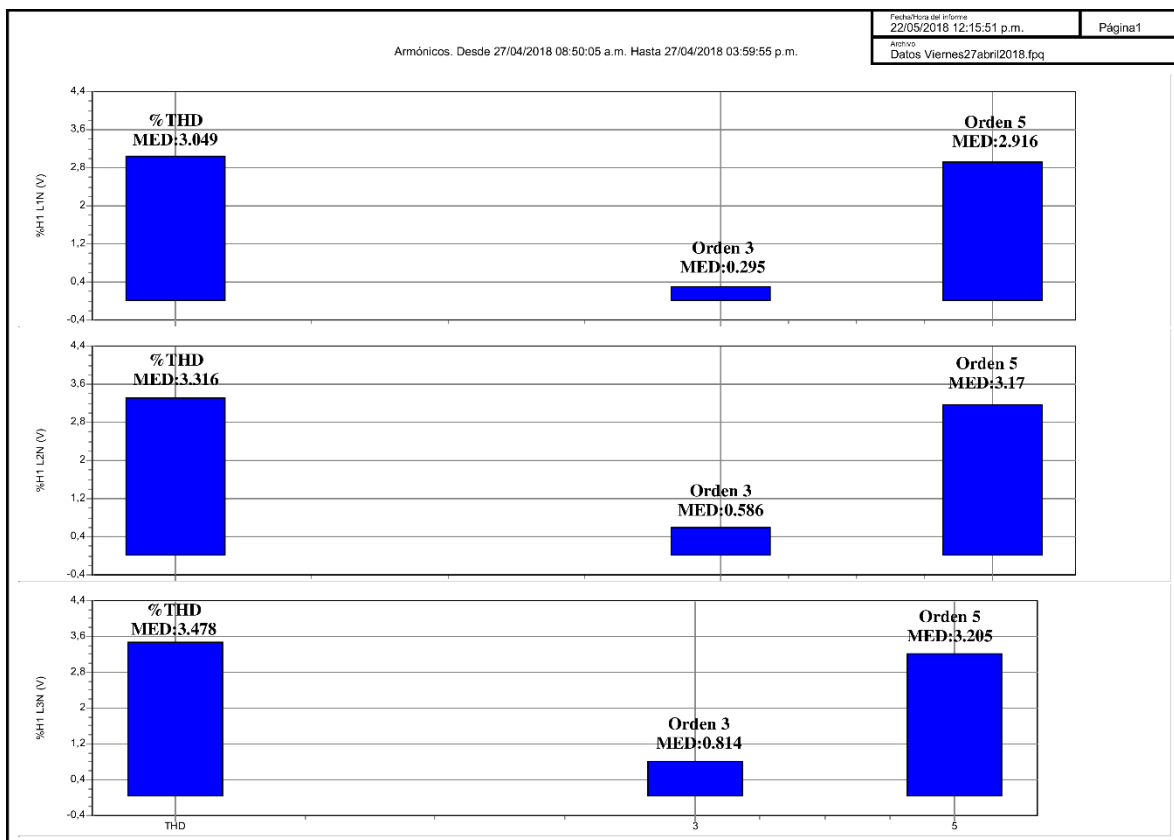


Figura 35. Histograma de las componentes armónicas de tensión y el THDv en las fases del día viernes 27 de abril.

Resumen						
Tabla						
Tensión y corriente						
Estadísticas						
Frecuencia / Desequilibrio						
Potencia						
Pantallas						
Armónicos						
Filtro						
Duración						
L1N(V) / L1(A)						
L2N(V) / L2(A)						
L3N(V) / L3(A)						
LNG(V) / N(A)						
Total						
Min.						
Max.						
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.	
27/04/2018 01:44:45 p.m. 0mseg	Tensión	123,06 V	122,49 V	123,1 V	0,09 V	
27/04/2018 01:44:45 p.m. 0mseg	Corriente	5,2 A	3,16 A	17,49 A	13,8 A	
27/04/2018 01:44:45 p.m. 0mseg	THD V	3,32%	3,62%	3,66%	126,82%	
27/04/2018 01:44:45 p.m. 0mseg	THD A	25,64%	66,47%	6,57%	19,79%	

Figura 36. Tabla de corrientes en para el caso en el que el THDi fue mínimo en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.

Resumen						
Tabla						
Tensión y corriente						
Estadísticas						
Frecuencia / Desequilibrio						
Potencia						
Pantallas						
Armónicos						
Filtro						
Duración						
L1N(V) / L1(A)						
L2N(V) / L2(A)						
L3N(V) / L3(A)						
LNG(V) / N(A)						
Total						
Min.						
Med						
Máx.						
Fecha	Función	LNG(V) / N(A) Min.	LNG(V) / N(A) Med	LNG(V) / N(A) Máx.		
27/04/2018 11:59:55 a.m. 0mseg	Tensión	0,09 V	0,09 V	0,09 V		
27/04/2018 11:59:55 a.m. 0mseg	Corriente	4,5 A	4,5 A	4,5 A		
27/04/2018 11:59:55 a.m. 0mseg	THD V	242,54%	243,06%	247,79%		
27/04/2018 11:59:55 a.m. 0mseg	THD A	327,67%	327,67%	327,67%		

Figura 37. Tabla de corrientes en para el caso en el que el THDi fue máximo en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 20 de abril.

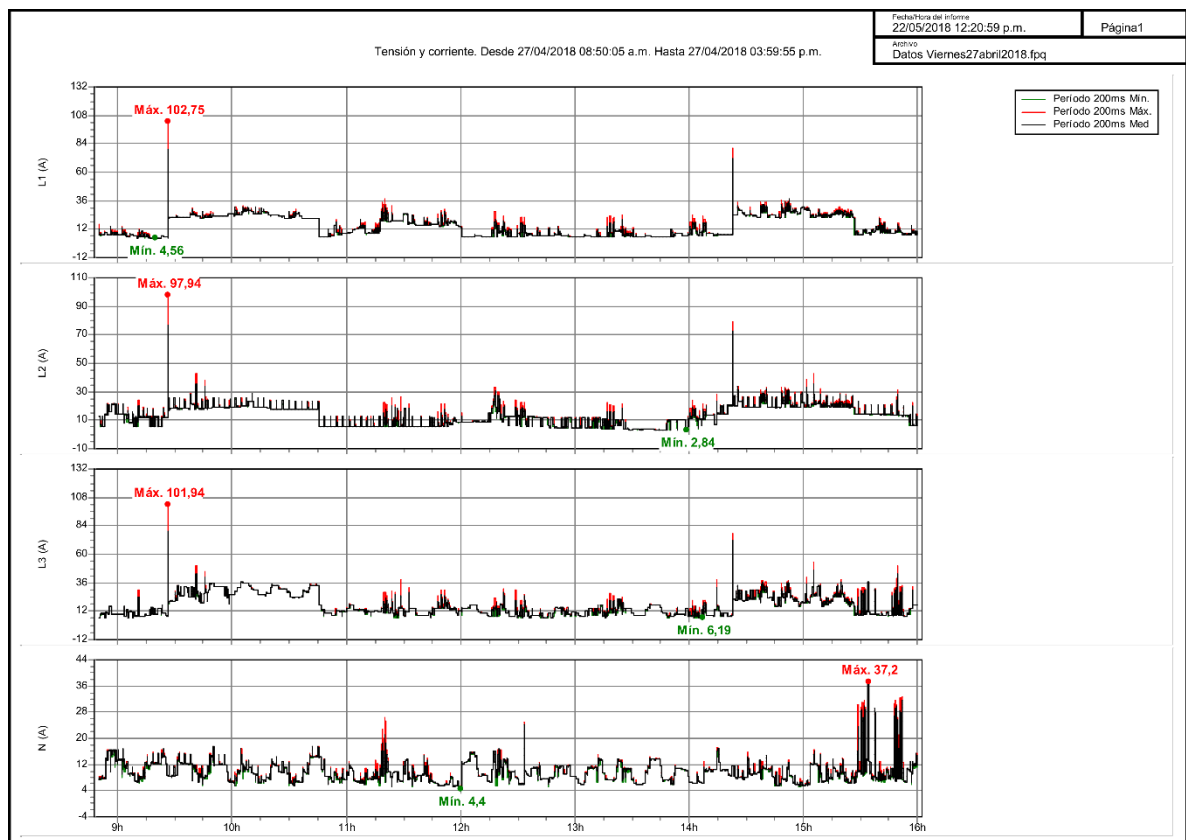


Figura 38. Corriente rms en las fases y en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 27 de abril.

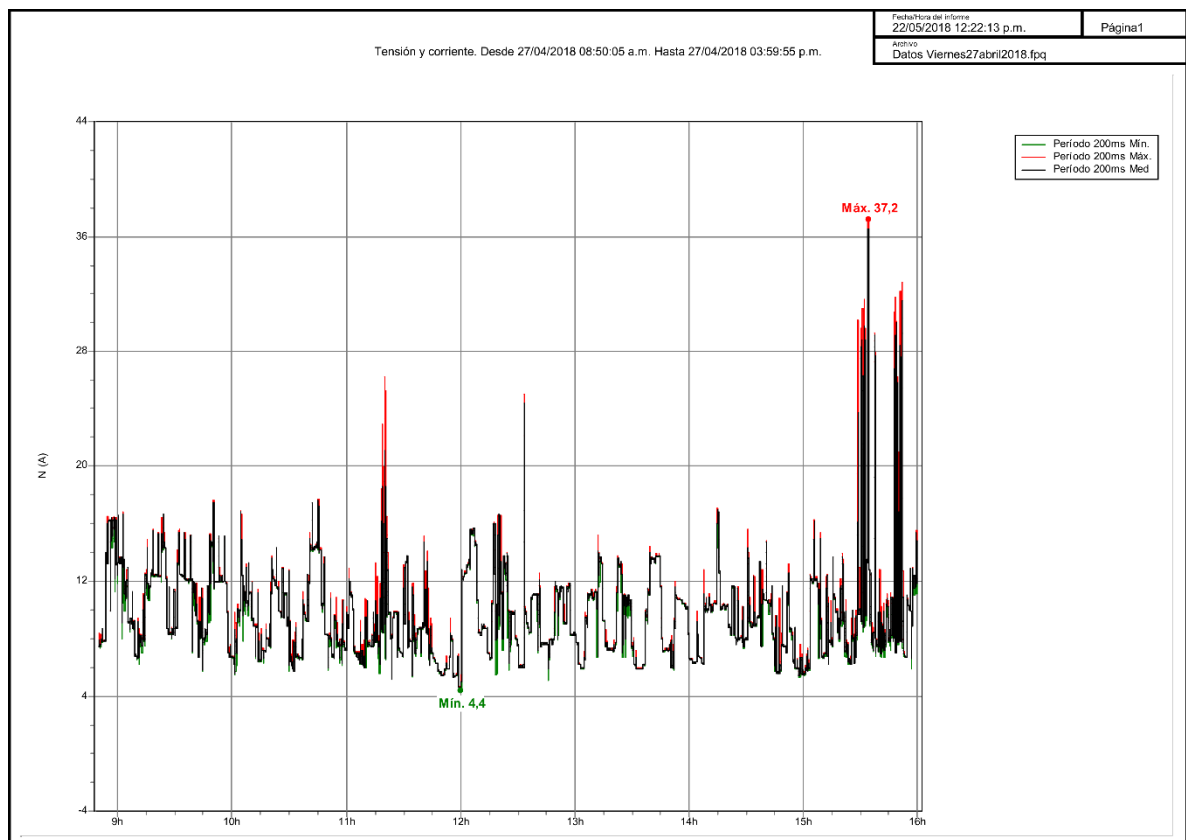


Figura 39. Corriente rms en el neutro en el periodo de tiempo del viernes 27 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
<input checked="" type="checkbox"/> Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input type="checkbox"/> Mín. <input type="checkbox"/> Máx.
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.		
27/04/2018 03:34:15 p.m. 0mseg	Tensión	122,07 V	121,69 V	122,42 V	0,14 V		
27/04/2018 03:34:15 p.m. 0mseg	Corriente	8,79 A	14,02 A	37,05 A	37,2 A		
27/04/2018 03:34:15 p.m. 0mseg	THD V	3,26%	3,61%	3,79%	174,14%		
27/04/2018 03:34:15 p.m. 0mseg	THD A	21,45%	20,55%	39,96%	53,43%		

Figura 40. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue máxima en el periodo de tiempo del viernes 27 de abril.

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Pantallas	Armónicos
<input checked="" type="checkbox"/> Filtro	<input type="checkbox"/> Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input type="checkbox"/> Total	<input checked="" type="checkbox"/> Mín. <input type="checkbox"/> Máx.
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Mín.	L2N(V) / L2(A) Mín.	L3N(V) / L3(A) Mín.	LNG(V) / N(A) Mín.		
27/04/2018 12:00:15 p.m. 0mseg	Tensión	123,17 V	122,77 V	123,6 V	0,09 V		
27/04/2018 12:00:15 p.m. 0mseg	Corriente	14,1 A	8,29 A	12,08 A	4,4 A		
27/04/2018 12:00:15 p.m. 0mseg	THD V	3%	3,21%	3,44%	252,57%		
27/04/2018 12:00:15 p.m. 0mseg	THD A	10,71%	37,62%	6,74%	327,67%		

Figura 41. Tabla de corrientes rms en donde la corriente en el neutro fue mínima en el periodo de tiempo del viernes 27 de abril.

### 6.5. Punto de conexión común

La medición se efectuó en el PCC (Punto de conexión común) entre el transformador y la carga en el punto donde se encuentra el totalizador que alimenta todos los circuitos, cumpliendo con las recomendaciones del estándar IEEE 519-2014, y de la guía de Circutor. [1][3]



Figura 42. Celda de protección subestación facultad de eléctrica.

## 7. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS MEDIDOS

Durante la realización de las mediciones no se detectaron fallas de equipos o en el sistema en general, a excepción del momento en el que se está utilizando el laboratorio de máquinas eléctricas, que es donde se presenta un aumento considerable de la carga, es en estos momentos del transcurso del día en donde se evidenciaron mayores niveles de consumo de corriente.

Los efectos de los armónicos de corriente en los sistemas polifásicos, y en algunos casos su presencia en la red puede ocasionar que los conductores que transportan corriente y el neutro sufran cierta sobrecarga, cabe resaltar que en este trabajo los armónicos que se observaron son de naturaleza característicos, es decir, no significan un problema considerablemente alto y riesgoso para la instalación, como lo son los armónicos no-característicos presentes en las industrias siderúrgicas, por el uso de los hornos de arco.

La normativa IEC 60364-5-52, indica una metodología aproximada que se aplica para dimensionar los conductores de fase y el neutro en los que se prevén con presencia armónicos característicos, considerando como los armónicos más predominantes el de tercer orden.

La interpretación de estos factores de reducción, conlleva que al aplicarlos si se posee un valor estimado del porcentaje de armónicos y la magnitud de corriente en la carga, se puede aplicar el factor correspondiente al porcentaje de armónicos, para encontrar la corriente equivalente total de la carga con presencia de armónicos para escoger adecuadamente el conductor.

Tabla 6— Factores de reducción para armónicos de corriente en redes de 4 hilos y 5 hilos- [12]

<b>Nivel corriente de tercer armónico por línea (%)</b>	<b>Selección según la corriente de línea</b>	<b>Selección según la corriente de neutro</b>
0-15	1	-
15-33	0,86	-
33-45	-	0,86
>45	-	1

Por ejemplo, un sistema trifásico con una carga de 39 A nominales por fase, en presencia de armónicos de un 20% del tercer orden, el factor a usar para el rango entre 15-33 % es 0.86.

$$\frac{39}{0.86} = 45 \text{ A}$$



La anterior ecuación es la forma correcta para aplicar el factor en cada una de las fases del sistema trifásico.

Si el tercer armónico en el neutro es igual al 40%, la sección del cable a escoger de acuerdo con la corriente que circula por el neutro es igual a:

$$39 \times 0.4 \times 3 = 46.8 \text{ A}$$

Donde el tres de la ecuación anterior es por ser un sistema trifásico asumido como balanceado.

Finalmente aplicando el factor correspondiente entre el rango de 33-45 % es de 0.86 en el conductor de neutro se tiene lo siguiente:

$$\frac{46.8}{0.86} = 54.4 \text{ A}$$

Por lo tanto, para una corriente de 46.8 A se necesitaría un conductor #6 Cu a 60°C, con una capacidad nominal de 55 A y para una corriente en la que se le aplico el factor de reducción que se encuentra del orden de 54.4 A el tamaño del cable será también #6 Cu a 60°C, con una capacidad nominal de 55 A.

Se encuentra entonces que, en muchos casos al aplicar el factor de reducción, que es entre otras cosas un factor que se aplica al conductor considerado con presencia de armónicos, este disminuye su capacidad total de conducir corriente, es por esto, al diseñar redes el factor de reducción que se aplica a la corriente en la carga, es un factor de reducción que significa un aumento en la corriente final de la carga, ayudando a escoger adecuadamente el conductor considerando presencia de armónicos.

Una consideración importante y correcta conforme a la existencia de cargas no lineales, requieren la selección del conductor de neutro con una sección transversal mayor o igual que la de los conductores de fase correspondientes.

### **7.1. Presencia de armónicos de corriente**

A continuación, se muestran en tablas resumen, los valores del THDi de corriente y los armónicos de tercer orden para los días de medición en la facultad de ingeniería eléctrica, estos fueron extraídos de los histogramas de cada día ver figuras 7, 16, 25, 34.

Las siguientes tablas corresponden al resumen de los datos del histograma para los periodos de tiempos de alrededor de 6 horas, estos porcentajes se comparan con la tabla 2, para niveles de tensión entre 120V y 69 Kv, encontrándose que para  $I_{sh}/I_L=24$ , siendo  $I_{sh}$  alrededor de 7.9 KA de corto circuito en el punto de conexión común entre la carga y el transformador en el lado de baja, el porcentaje recomendado para los armónicos entre el 3 y el 11, es de 7%.

Se observa en las mediciones que se sobrepasa este porcentaje, que lógicamente es un indicativo de la presencia de cargas no lineales que distorsionan la forma de onda de la corriente. Dicho esto, del análisis con cuidado, se observa que las magnitudes rms de las corrientes por las fases, y el desbalance existente. También existe una corriente que circula por el conductor de neutro, como se observó en las figuras 9, 10, 13, 14, 18, 19 22, 23, 27, 28, 31, 32, 36, 37, 40, 41. Estas permiten comprender mejor las tablas siguientes, puesto que, las magnitudes de corrientes rms no son lo suficientemente altas bajo la presencia de altos porcentajes de armónicos como para concluir que son un problema para la red.

Tabla 7— Resumen histograma de armónicos de corriente.

Fecha 17/08/2018 - Martes		
<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tercer orden</b>	<b>%THDi</b>
A	27,039	39,44
B	19,372	28,496
C	4,82	16,559
N	51,296	54,03

Tabla 8— Resumen histograma de armónicos de corriente.

Fecha 18/08/2018 - Miercoles		
<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tercer orden</b>	<b>%THDi</b>
A	27,499	30,19
B	23,602	30,476
C	8,147	14,081
N	65,94	68,821

Tabla 9— Resumen histograma de armónicos de corriente.

Fecha 20/08/2018 - Viernes		
<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tercer orden</b>	<b>%THDi</b>
A	20,987	33,2
B	21,328	47,445
C	4,211	31,28
N	25,629	29,206

Tabla 10— Resumen histograma de armónicos de corriente.

Fecha 27/08/2018 - Viernes		
<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tercer orden</b>	<b>%THDi</b>
A	15,741	18,418
B	28,495	32,494
C	4,909	10,924
N	60,358	64,789

Por último, la siguiente tabla corresponde al resumen de datos medidos con el mismo dispositivo Fluke 434, en un edificio residencial durante 1 hora en la hora de mayor demanda.

Tabla 11— Resumen histograma de armónicos de corriente.

<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tercer orden</b>
A	21
B	3
C	2
N	23

## 7.2.Presencia de armónicos de tensión

La tabla 1 del estándar IEEE 519, recomienda ciertos valores de distorsión armónica para diferentes niveles de tensión, encontrándose que durante los tiempos de medición nunca se sobrepasaron dichos límites.

En el punto de conexión común el nivel de tensión es menor a 1 Kv, por lo que el límite de distorsión armónica de corriente es del 5% y el límite de distorsión armónica total es de 8% de THDv.

Las siguientes tablas corresponden a los valores en porcentaje del histograma de armónicos de tensión de la medida correspondiente por días, se observa que se encuentra correctamente dentro de los límites establecidos por el estándar IEEE 519.

Tabla 12— Resumen histograma de armónicos de tensión.

Fecha 17/08/2018 - Martes			
Fase	%(A) Armonicos tensión tercer orden	%(A) Armonicos tensión quinto orden	%THDv
A	0,33	2,984	3,234
B	0,743	3,355	3,72
C	0,754	3,168	3,612

Tabla 13— Resumen histograma de armónicos de tensión.

Fecha 18/08/2018 - Miercoles			
Fase	%(A) Armonicos tensión tercer orden	%(A) Armonicos tensión quinto orden	%THDv
A	0,37	2,661	2,87
B	0,61	3,035	3,28
C	0,773	2,88	2,258

Tabla 14— Resumen histograma de armónicos de tensión.

Fecha 20/08/2018 - Viernes			
<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tensión tercer orden</b>	<b>%(A) Armonicos tensión quinto orden</b>	<b>%THDv</b>
A	0,291	2,952	3,12
B	0,82	3,321	3,6
C	0,546	3,323	3,472

Tabla 15— Resumen histograma de armónicos de tensión.

Fecha 27/08/2018 - Viernes			
<b>Fase</b>	<b>%(A) Armonicos tensión tercer orden</b>	<b>%(A) Armonicos tensión quinto orden</b>	<b>%THDv</b>
A	0,295	2,916	3,049
B	0,586	3,17	3,316
C	0,814	3,205	3,478

## CONCLUSIONES

No se observan perturbaciones graves que afecten a la red de baja tensión de la facultad de ingeniería eléctrica, el sistema está diseñado con amplio margen para soportar sobrecargas de corrientes, debido que, el nivel de demanda es relativamente bajo para los conductores existentes.

El fluke 434, tiene el inconveniente que, en el reporte de resultados, no es posible observar las magnitudes en valor absoluto de las corrientes armónicas, este equipo, solo tabula en el histograma del tiempo de medida los porcentajes de los armónicos individuales y el THD en porcentaje, y no es posible tener un valor medio de las corrientes rms durante el rango de tiempo medido. Si dispone un menú de estadísticas donde muestra las corrientes máximas o mínimas en todo el periodo medido, pero no un valor medio, necesario para ser comparado con los porcentajes del histograma.

De los histogramas se puede concluir que, los armónicos de tensión son bastante bajos, y no sobrepasan los límites que recomienda el estándar IEEE 519, por otro lado los porcentajes de armónicos de corrientes que por definición son los que mayores problemas causan, es cierto que algunos de estos porcentajes exceden los límites recomendados, pero esto no representa un problema significativo en la red, es decir, puede existir un THD del 50% pero la corriente nominal en la carga es de 2 A, realmente esto no se concibe como un problema, de forma análoga si se tiene un porcentaje igual del 50% pero existe una corriente del orden de los 100 A, esto si significa un problema más moderado que necesitaría un estudio.

De las figuras 9, 10, 13, 14, 18, 19 22, 23, 27, 28, 31, 32, 36, 37, 40, 41. donde se tabularon los momentos críticos donde las corrientes y el THD eran máximas, mínimas, se observó que cuando las corrientes eran máximas el THD era mínimo, y cuando las corrientes eran mínimas el THD era máximo en el periodo total de tiempo, es decir que el problema de armónicos no era totalmente significativo puesto que no se encontró un valor máximo de corriente asociado con un valor máximo de porcentaje de THD.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda configurar adecuadamente los equipos o el equipo de media, para esto es importante asesorarse bien con el manual de usuario y/o pedir soporte técnico del equipo para resolver las dudas conforme al objetivo de las mediciones.

En el manejo de normas, es importante como objetivo principal realizar una adecuada interpretación de la norma y si es necesario consultar con un profesional en el manejo del tema, para evitar errores.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE-SA Standards Board, “IEEE-519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, March. 27,2014.
- [2] E. Esperanza Parra López, “Análisis de armónicos en sistemas de distribución”, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [3] Circutor, “Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas”, [online]. Disponible: <http://circutor.es/es/documentacion-es/empresa/597-procedimientos-para-el-estudio-y-analisis-de-perturbaciones-armonicas>
- [4] Balcells, Josep; et all, “Eficiencia en el uso de la energía eléctrica”, Alfaomega Grupo Editor, S.A
- [5] Universidad Politécnica Salesiana, Capitulo II; “Armónicos en redes eléctricas”. Disponible:[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=384495](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495)
- [6] Dr. John Cheng, CEng, CEM, CEA, CMVP, “IEEE Standard 519-1992 vs. 2014”, Schneider Electric.
- [7] IEC Standard 61000-4-7, Guía general de armónicos e Inter armónicos medición e instrumentación, para sistemas de alimentación de equipos conectados.
- [8] IEC Standard 61000-4-30, Métodos de medición de calidad de la energía.
- [9] IEC Standard 61000-4-15, técnicas de prueba y medidas -Flickermeter- Diseños funcionales y especificaciones.
- [10] IEEE Std 1453<sup>TM</sup>, IEEE practicas recomendadas – adopción de IEC 61000-4-15:2010, compatibilidad electromagnética (EMC)- Pruebas y técnicas de medida -Flickermeter- Diseños funcionales y especificaciones.
- [11] “Fuente sinusoidal carga no lineal "Electrónica de potencia, Daniel W. Hart, 1ra edición, página 46.
- [12] “IEC Standard 60364-5-52, Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems.